

Serge Haroche, Prix Nobel 2012

« Nous sommes déjà au cœur de la deuxième révolution quantique »



LES PROMESSES DU MONDE QUANTIQUE

Quel avenir nous dessinent les physiciens ?

« Le débat Einstein-Bohr est clos », par Alain Aspect

Le chat de Schrödinger bientôt libéré ?

Omniprésente physique quantique : LED, GPS, IRM, rouge-gorge...



DOSSIER POUR LA SCIENCE BIOLOGIE QUANTIQUE - CRYPTOGRAPHIE - ORDINATEUR - GRAVITATION

M 01930 - 93 - F: 7,50 € - RD

BEL : 8,9 € - CAN : 12,5 $CAD - DOM/S : 8,9 € - ESP : 8,5 € - GR : 8,5 € - LUX : 8,5 € - MAR : 100 MAD - TOM /A : 2 290 XPF - TOM /S : 1 260 XPF - PORT.CONT. : 8,5 € - CH : 16,2 CHF

N° 93 octobre-décembre 2016

pourlascience.fr



pourlascience.fr

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06
• Tél: 01-55-42-84-00 • www.pourlascience.fr

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin
Maquettiste: Raphaël Queruel

Pour la Science
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont et Sean Bailly

Directrice artistique: Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative: Anne-Rozenn Jouble

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gesippe assisté de William Rowe-Pirra et Alice Maestracci

Marketing et diffusion: Laurence Hay et Ophélie Maillet

Directrice de la publication et Gérante: Sylvie Marcé

Direction financière et direction du personnel: Marc Laumet
Fabrication: Marianne Sigogne assistée d'Olivier Lacam
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: Maud Bruguière

Presse et communication

Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr
Tél.: 01 55 52 85 05

PUBLICITÉ FRANCE

Directeur de la publicité: Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience.fr
Tél.: 01 55 42 84 28

SERVICE ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: http://boutique.pourlascience.fr

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Téléphone: 03 67 07 98 17 (de 9 h à 12 h et de 13 h à 16 h)

Adresse postale: Service des abonnements - Pour La Science 19 rue de l'Industrie - BP 90053 - 67402 Illkirch Cedex

Commande de magazines numériques

Groupe Pour la Science
Mail : www.pourlascience.fr

DIFFUSION POUR LA SCIENCE

Contact kiosques: À Juste Titres - Benjamin Boutonnet
Tél: 04.88.15.12.41
Information/modification de service/réassort: Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

Tarifs d'abonnement 1 an – 16 numéros
France métropolitaine : 79 euros
Europe : 95 euros
Reste du monde : 114 euros

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina.
Editors: Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.
President: Steven Inchcoombe.
Executive Vice President: Michael Florek.



Loïc MANGIN,
rédacteur en chef adjoint

Grandir avec la physique quantique

Arrêtez de reprocher à vos enfants d'être constamment rivés à leur téléphone, à leur tablette, aux réseaux sociaux... ils font de la physique quantique! Enfin, presque. Plus précisément, ils utilisent tous les objets du quotidien qui n'auraient pu voir le jour sans les connaissances acquises sur les particules et la lumière depuis un siècle. En d'autres termes, ils profitent des bienfaits de la première révolution quantique sans savoir ce qu'elle recouvre.

Ils ne sont pas les seuls. Parmi les physiciens en pointe dans ce domaine, l'Américain Richard Feynman, Prix Nobel de physique pour ses travaux en électrodynamique quantique, disait dans les années 1960: « Nous avons toujours eu beaucoup de mal à comprendre l'image du monde que nous offre la mécanique quantique. Du moins, en ce qui me concerne, parce que je suis assez âgé... (...) À chaque nouvelle idée, il faut une ou deux générations pour constater qu'elle ne pose pas de vraie difficulté. »

La lumière viendra peut-être avec la deuxième révolution quantique, déjà engagée, qui porte en elle d'autres applications encore plus étonnantes (ordinateur quantique, cryptographie inviolable...) présentées dans ce numéro. Les articles réunis montrent que les physiciens comprennent et domptent de mieux en mieux les aspects contre-intuitifs de la physique quantique (intrication, décohérence, superposition d'états...). L'enjeu est d'importance, car elle s'applique à toutes les échelles de l'Univers... et aux futurs gadgets de vos petits-enfants !


Les promesses du monde quantique



À l'échelle de l'Univers

Rendez-vous par Loïc Mangin

© agsandrew / shutterstock.com

Il était deux fois la **révolution** quantique

Depuis un peu plus d'un siècle, la physique quantique révèle le fonctionnement intime du monde microscopique. Ses résultats, parfois contre-intuitifs, ont conduit à des applications incontournables de notre vie quotidienne : c'est la première révolution quantique. La deuxième est en cours...

■ Comment est née la physique quantique ?

Serge Haroche : Au début du XXe siècle, les succès de la mécanique, de l'électromagnétisme et de la thermodynamique classiques laissaient penser que la physique était une science quasiment achevée. Néanmoins, deux problèmes restaient en suspens. Le premier était lié à la valeur de la vitesse de la lumière : Einstein a montré qu'elle est indépendante de la vitesse du repère dans lequel elle est mesurée, ce qui a conduit à renoncer à la notion de temps absolu. L'autre problème venait du spectre du rayonnement d'un corps chauffé qui n'obéissait pas aux règles de la physique classique. Einstein, encore lui, a résolu la question en reprenant une idée de Planck. Il a postulé que les ondes lumineuses sont également constituées de corpuscules (plus tard nommés photons). C'est de là qu'est née la notion de dualisme entre onde et particule. La solution à ces deux problèmes a ainsi conduit à la théorie de la relativité et à la physique quantique. Pour cette dernière, il a fallu une vingtaine d'années de tâtonnements avant d'aboutir à une théorie mathématiquement complète. Une fois établie, elle est devenue un outil extraordinaire pour comprendre la nature.

■ De cette dualité onde-corpuscule découlent tous les grands piliers de la physique quantique.

Serge Haroche : L'un de ces piliers est le principe de superposition d'états. Un système microscopique, par exemple un atome – qui est comme la lumière à la fois onde et particule – peut, à l'instar d'une onde, se trouver en plusieurs endroits à la fois ; il peut aussi être en même temps dans des états d'énergies différentes ; un photon peut aussi être simultanément dans divers états de polarisation. Ce concept essentiel de superposition mène à une autre notion importante, celle d'intrication *(voir Le débat Einstein-Bohr est complètement clos, par A. Aspect, page 22)*. Les parties d'un système ayant interagi restent liées : les mesures faites sur l'une ont un effet immédiat sur les résultats des mesures faites sur l'autre, même quand ces parties sont très éloignées.

Une autre conséquence de la dualité onde-corpuscule est la nature probabiliste de la physique quantique. L'onde associée à une particule est en fait une onde de probabilité : son intensité correspond à la probabilité de trouver la particule en un endroit donné. En introduisant ce dualisme pour décrire la lumière, Einstein a ouvert une boîte de Pandore, instillant en physique une idée profondément contre-intuitive pour un esprit classique. Cette physique ne prédit pas à coup sûr le résultat d'une expérience donnée, mais ne fait que prévoir les probabilités des résultats possibles. Les concepts de superposition d'état et d'onde de probabilité sont enfin associés au phénomène d'interférence quantique : des ondes de probabilités qui se superposent peuvent s'additionner ou se soustraire selon qu'elles sont en phase ou non, ce qui est très différent des lois régissant les probabilités classiques.

■ Quels problèmes conceptuels pose encore la physique quantique ?

Serge Haroche : Évoquons l'articulation avec l'idée de réalité *(voir l'entretien avec A. Auffèves, page 18)* et les questions d'interprétation de la théorie qui soulèvent des contradictions entre la description quantique de la nature et ce que certains voudraient qu'elle soit. Pour la plupart des physiciens, il n'y a pas de véritable question, puisque le formalisme permet de faire des prédictions précises en accord avec les résultats de toutes les expériences faites à ce jour. Et le fait que ces prédictions sont non déterministes ne constitue pas pour eux un problème puisqu'un ensemble d'observations réalisées sur des systèmes identiques, donne toujours une distribution de résultats aléatoires, régis par les lois statistiques formulées par la théorie quantique. En d'autres termes, pour la majorité des physiciens, la théorie quantique est statistique parce que la nature l'est fondamentalement. D'autres en revanche n'acceptent pas ce hasard qu'ils tentent de dépasser pour décrire une réalité objective déterministe. Toutes ces discussions restent encore loin de l'analyse de phénomènes physiques précis. La difficulté est d'imaginer des expériences cruciales qui contrediraient la physique quantique.



Serge HAROCHE
Prix Nobel de physique en 2012, est professeur honoraire au Collège de France. Il mène ses recherches au laboratoire Kastler Brossel (ENS, Collège de France, université Paris VI et CNRS).

©DR

Un autre problème est la confrontation avec la gravitation...

Serge Haroche: La gravitation est la seule force de la nature qui n'est pas décrite de façon cohérente dans le cadre de la physique quantique *(voir La gravitation quantique en 2D, par S. Carlip, page 100)*. Les théoriciens cherchent à résoudre ce problème et à unifier théorie quantique et gravitation, en particulier dans le cadre de la théorie des cordes. Selon certains, cette unification offrirait un éclairage inédit sur les problèmes d'interprétation. Mais l'idée que l'on pourrait en unifiant gravitation et physique quantique rendre les concepts de celle-ci moins contre-intuitifs reste très hypothétique. Toujours est-il que ces deux théories, nées en grande partie il y a cent ans des travaux d'Einstein, sont encore en conflit.

À l'intérieur même de la mécanique quantique, quels défis théoriques subsistent?

Serge Haroche: La théorie quantique connaît un succès éclatant. Toutes les expériences que l'on a pu faire avec une précision toujours plus grande l'ont confirmé. Le modèle standard des particules, en particulier, est conforté par toutes les observations. Un jour, on découvrira peut-être des particules qui n'entrent pas dans ce modèle, mais elles ne remettront probablement pas en cause les principes quantiques qui continueront à s'appliquer pour fournir le cadre de la description du monde microscopique.

Quels sont les derniers résultats que vous jugez très importants?

Serge Haroche: Dans mon domaine, celui de l'information quantique, on manipule des objets quantiques individuels et on cherche à mettre en évidence la logique quantique, c'est-à-dire à étudier comment se manifestent directement les superpositions d'états et l'intrication... Aujourd'hui, il y a deux types de systèmes avec lesquels des expériences ont été conduites assez loin. Il s'agit d'une part d'ensembles d'atomes ou d'ions individuels piégés et d'autre part de réseaux de circuits supraconducteurs. Le grand rêve de cette physique est l'ordinateur quantique qui exploiterait directement les concepts quantiques pour calculer plus rapidement et plus efficacement que les ordinateurs classiques *(voir L'ordinateur quantique en kit, par Ch. Monroe, page 62)*. Cet objectif reste encore très éloigné, car on ne sait manipuler que de petits systèmes (formés de quelques ions ou de quelques circuits) alors qu'un dispositif de ce genre, pour être utile, devrait fonctionner à une échelle beaucoup plus macroscopique. Les superpositions d'états ont tendance à se brouiller lorsqu'on les manipule dans des systèmes de plus en plus grands. C'est la décohérence.

Des progrès considérables ont été récemment accomplis pour limiter cette décohérence, mais beaucoup reste encore à faire. Dans des domaines annexes, on arrive cependant déjà à des résultats qui seront utiles dans des dispositifs pratiques, par exemple en métrologie quantique. On espère pouvoir fabriquer des appareils plus précis que ceux relevant de la physique classique pour mesurer de faibles champs magnétiques ou électriques, ou encore pour compter des intervalles de temps. Les horloges atomiques ont récemment fait des progrès gigantesques. Celles dont on dispose sont déjà fondées sur un phénomène quantique, les oscillations des électrons dans les atomes. Elles ont atteint une précision extraordinaire (une seconde seulement de dérive sur l'âge de l'Univers). Et l'on cherche à améliorer encore ces performances grâce à des dispositifs exploitant l'intrication quantique.

Pour améliorer les systèmes de GPS?

Serge Haroche: Ceux qui équipent nos véhicules et nos téléphones constituent l'application la plus spectaculaire des horloges atomiques. Elles sont embarquées dans des satellites coordonnés qui nous envoient des signaux de façon à déterminer notre position par triangulation. La précision actuelle est de l'ordre du mètre. Avec des horloges plus performantes, on pourra augmenter cette précision, mais on peut aussi imaginer des applications nouvelles. Ces horloges sont sensibles au fait que l'écoulement du temps dépend du champ de gravitation. On pourrait alors mesurer des

variations locales extrêmement faibles de ce champ pour prédire l'imminence de tremblements de terre. C'est encore spéculatif, mais c'est une des applications possibles.

Dans le domaine des applications, on distingue deux révolutions.

Serge Haroche: La première est celle des appareils présents dans notre vie quotidienne qui utilisent la physique quantique, mais sans exploiter directement ses aspects contre-intuitifs. Elle est fondée sur la connaissance des lois du monde microscopique, au niveau des électrons et des atomes. Ainsi, la compréhension de l'écoulement des électrons dans les solides s'est-elle traduite par la mise au point des matériaux semi-conducteurs, de la supraconductivité et donc de toute l'électronique moderne et des ordinateurs classiques. Autre exemple, les lasers résultent de ce que l'on a appris des interactions quantiques de la lumière avec la matière.

Ce qu'on appelle maintenant la deuxième révolution est lié au développement d'appareils où la logique quantique jouera un rôle important et direct *(voir La physique quantique de proximité, par T. Giamarchi, page 34)*. Ce sont la métrologie et les ordinateurs quantiques, dont nous venons de parler, ainsi que la communication quantique. Cette dernière exploite les corrélations de mesures faites sur des systèmes éloignés et intriqués. Imaginez deux joueurs distants lançant chacun un dé: le résultat est aléatoire, mais toujours identique pour les deux. Ce hasard non local peut être exploité pour transmettre des clés de cryptographie inviolables *(voir Les gardiens de notre vie privée, par A. Ekert, page 40)*. Ce principe a déjà été mis en œuvre et a prouvé son efficacité sur des distances de plusieurs dizaines de kilomètres.

Cette seconde révolution a une face conceptuelle – l'exploitation de l'intrication et des superpositions – et un aspect pratique. Elle nécessite de savoir isoler des systèmes quantiques (atomes, photons...) et de les mesurer individuellement. Ceci a été rendu possible grâce aux lasers, à la supraconductivité et à tous ces outils qui sont le fruit de la première révolution quantique. Ces deux révolutions sont ainsi intimement liées.

La première révolution nous enseigne une leçon à méditer. Les pères fondateurs de la théorie, les Einstein, Bohr ou Schrödinger, motivés par la curiosité gratuite, se sont attachés à comprendre sur un plan fondamental le monde microscopique, sans annoncer les applications qui allaient résulter de leurs découvertes. Ces applications les auraient d'ailleurs considérablement surpris. Les physiciens qui ont découvert la résonance magnétique nucléaire ne se doutaient pas qu'elle serait au cœur d'un extraordinaire outil d'imagerie médicale, l'IRM. La situation est aujourd'hui analogue : on essaie d'imaginer ce qui va advenir, mais on aura à coup sûr des surprises. Notre génération de physiciens est poussée à promettre beaucoup. Cela s'explique en partie par le besoin de trouver des financements pour des recherches de plus en plus coûteuses. Certaines de ces promesses verront le jour. D'autres applications, peut-être encore plus surprenantes, naîtront sans doute. L'histoire de la première révolution quantique nous apprend que, le plus souvent, les applications résultent de technologies nées de recherches fondamentales diverses qui se complètent de façon imprévue.

C'est justement le cas de l'IRM?

Serge Haroche: Oui, les physiciens qui ont découvert la RMN (résonance magnétique nucléaire) dans les années 1940 ne pouvaient imaginer l'IRM, car il n'y avait pas d'ordinateurs à cette époque. Or ils sont indispensables pour transformer les signaux radiofréquence en images. En outre, les puissants aimants requis par cette technologie n'avaient pas encore été élaborés. Ceux que l'on utilise aujourd'hui fonctionnent grâce à la supraconductivité, encore une technologie quantique. C'est la conjonction de ces trois éléments qui a permis la naissance de l'IRM.

La physique quantique intervient aussi aux très grandes échelles?

Serge Haroche: Selon les cosmologistes, les fluctuations détectées dans l'intensité ou dans la polarisation du rayonnement cosmologique reflètent celles qui existaient dans l'Univers primordial, avant que la matière et la lumière se séparent, environ 380 000 ans après le Big Bang *(voir Les premières ondes gravitationnelles, par L. Krauss, page 80)*. Ces fluctuations primordiales sont de nature fondamentalement quantique. Ainsi, la physique quantique est essentielle pour comprendre la physique, même à l'échelle de l'Univers.

Toujours au niveau cosmologique, qu'en est-il des ondes gravitationnelles primordiales?

Serge Haroche: En 2014, une équipe a affirmé avoir détecté un signal qu'elle a interprété comme une observation indirecte d'ondes gravitationnelles primordiales. L'annonce a finalement été démentie. Mais des modèles cosmologiques prévoient l'existence de ces ondes. Les recherches se poursuivent, car leur observation serait une des clés pour comprendre l'origine de notre Univers.

Je crois cependant que le résultat de physique le plus important de 2016 est la première détection d'ondes gravitationnelles (non primordiales), dont l'existence était prédite par la théorie de la relativité générale d'Einstein de 1915. On le dit rarement, mais cette découverte est aussi un triomphe de la technologie quantique. Les antennes gravitationnelles modernes sont des interféromètres utilisant des lasers ultra stables. Ces appareils sont des versions modernes de l'interféromètre historique que Michelson a utilisé dans les années 1880 pour montrer que la vitesse de la lumière est indépendante de sa direction de propagation sur Terre, ce qu'Einstein devait expliquer en 1905 dans sa théorie de la relativité restreinte. On est passé du modèle original tenant sur une table d'expérience, à deux appareils gigantesques d'une précision extraordinaire opérant en tandem. Alors que le dispositif original était constitué de bras perpendiculaires mesurant des déphasages de la lumière associés à des différences de longueur de l'ordre du micron, les antennes gravitationnelles modernes sont des dizaines de milliards de fois plus précises. Les bras où circulent les lasers ont une longueur de 4 kilomètres et le passage d'une onde gravitationnelle s'est traduit dans ces détecteurs par une différence de longueur entre leurs bras beaucoup plus petite que le diamètre d'un noyau atomique ! Cette onde a été produite par la coalescence il y a plus de un milliard d'années de deux trous noirs. Cent trente ans après l'expérience du XIXe siècle, c'est donc une version fortement améliorée du même appareil qui confirme aujourd'hui une prédiction fondamentale d'une autre théorie d'Einstein. Et cette découverte va sans doute bouleverser l'astrophysique du XXIe siècle, en lui ouvrant une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers. ■

Propos recueillis par Loïc MANGIN

Un laboratoire de recherche
du CNRS
de l'Ecole Normale Supérieure
de l'Université Pierre et Marie Curie
et du Collège de France

Comprendre le monde quantique

LABORATOIRE KASTLER BROSSEL

Développer ses applications



2016, Cinquantième anniversaire du Prix Nobel d'Alfred Kastler :

- Une exposition du 10 octobre au 31 décembre à l'École Normale Supérieure
- La fête de la Science les 15 et 16 octobre à l'Université Pierre et Marie Curie
- Un symposium scientifique international le 1er décembre 2016 à l'École Normale Supérieure

www.alfredkastler.fr

3 PRIX NOBEL
Alfred Kastler
Claude Cohen Tannoudji
Serge Haroche

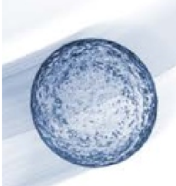
www.lkb.science





UNE ÉTRANGE RÉALITÉ

La physique quantique, en révélant les lois qui régissent l'infiniment petit, a mis en évidence des propriétés contre-intuitives qui bousculent le sens commun. On peut s'en accommoder et faire avec, ou bien, avec les philosophes, s'interroger sur ce qu'elles révèlent du réel. Bohr et Einstein s'étaient aussi opposés quant à l'interprétation à donner à la physique quantique, mais là, les expériences ont tranché.



QU'EST-CE QU'UN ATOME ? Un ensemble d'électrons en orbite autour d'un noyau ? Pas tout à fait... la physique quantique révèle que c'est un peu plus compliqué.

Le noyau : entre **liquide** et **cristal**

On l'imagine le plus souvent sphérique, mais le noyau des atomes se présente en fait sous une grande variété de formes et d'états. Comment expliquer une telle diversité ?

Jean-Paul EBRAN
est chercheur au CEA à Arpajon.

Elias KHAN
est professeur à l'université Paris-Sud et à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay. Il est membre de l'Institut universitaire de France.

L'ESSENTIEL

- **Le noyau atomique présente une grande diversité de formes et de structures.**
- **La compétition entre le caractère quantique des éléments du noyau et leurs interactions définit trois phases.**
- **Ce sont le « liquide quantique », le « noyau moléculaire » et une phase cristalline.**
- **Certains noyaux sont constitués en agrégats, tels les atomes dans une molécule. Cet état « moléculaire » a été essentiel dans la formation des éléments tel le carbone.**
- **La phase cristalline est présente dans les étoiles à neutrons.**

Aplatis, en forme de poire, de banane, de bulle… À quoi correspond cette panoplie de formes ? À celle qu'obtiennent les physiciens lorsque, avec des modèles et des expériences, ils s'intéressent aux noyaux des atomes *(voir la figure ci-contre)*. Ainsi donc, la vision classique d'un noyau sphérique est, au mieux, incomplète.

Elle est héritée du modèle du physicien néo-zélandais Ernest Rutherford (1871-1937) et de la représentation d'un atome sous la forme d'une sorte de système planétaire microscopique, où des électrons sont en orbite autour d'un noyau. Avec la mécanique quantique, ce schéma s'est affiné en faisant correspondre au cortège électronique un nuage (de densité de probabilité de présence des électrons) plutôt que des orbites. Quant au noyau atomique, les physiciens s'en font désormais une idée bien plus complexe qu'auparavant. Il reste du chemin à parcourir, car plus d'un siècle après sa découverte le noyau atomique n'a pas encore livré tous ses secrets.

Les physiciens sont en quête d'un cadre unique dans lequel la diversité des structures du noyau s'expliquerait naturellement. La tâche est ardue, tant le noyau est un objet quantique difficile à étudier : il est constitué d'éléments eux-mêmes complexes, et trois des quatre forces fondamentales de la nature contribuent à la dynamique de cet assemblage.

Néanmoins l'idée que la variété découle d'un petit nombre de règles fondamentales n'est pas nouvelle. Les chimistes ont ainsi ordonné les éléments dans un tableau en fonction de propriétés qui dépendent du nombre d'électrons sur les couches externes de l'atome. Par ailleurs, les centaines de particules (les hadrons) découvertes dans les collisionneurs ont pu être classées lorsqu'on a compris qu'elles étaient un assemblage de particules élémentaires, les quarks.

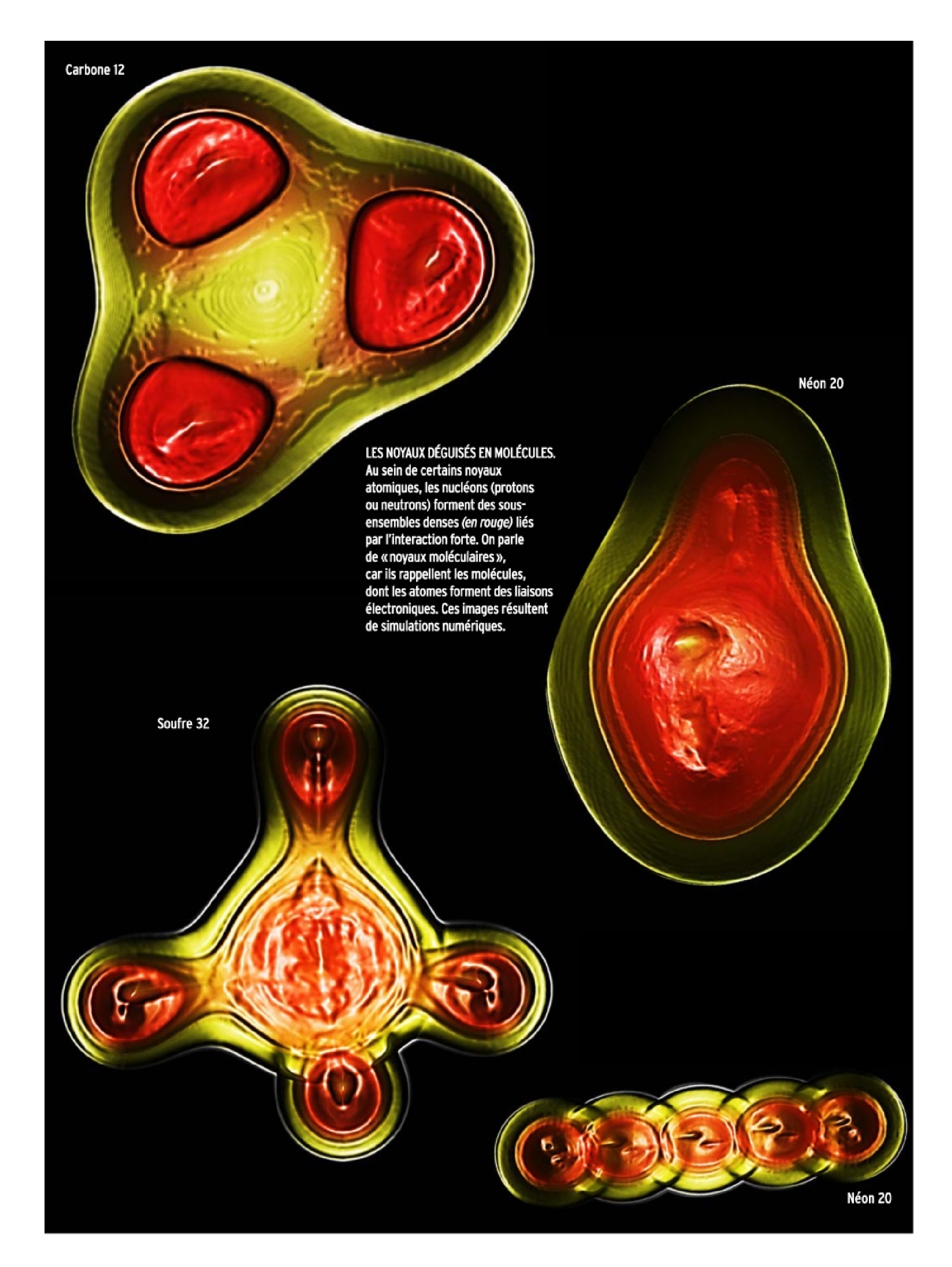
Pour comprendre la variété des structures du noyau, nous avons donc recherché des règles sous-jacentes et développé une approche théorique qui rend compte des différentes phases du noyau. Similaires aux phases solide, liquide et gazeuse de la matière ordinaire, ces phases dépendent des propriétés de ses composants, les protons et les neutrons. Nous devons donc comprendre la structure du noyau avant d'en étudier les phases.

Au cœur du noyau

La vision que l'on a du noyau atomique n'a cessé d'évoluer depuis sa mise en évidence en 1911 par Rutherford. Ce physicien menait alors des expériences pour comprendre la structure de l'atome. Les chercheurs de l'époque savaient que l'atome contenait des électrons, mais il devait renfermer autre chose pour compenser la charge électrique négative des électrons. On pensait l'atome comme un objet de 10^{-10} mètre de diamètre où les électrons étaient incrustés, à l'image d'un gâteau contenant des raisins secs. En bombardant une feuille d'or avec des particules α (des noyaux d'hélium) et en mesurant l'angle de déviation des particules rebondissant sur la feuille, Rutherford a compris que l'atome est en réalité constitué d'un minuscule noyau très dense, d'environ 10^{-15} mètre de diamètre et chargé positivement, accompagné d'un cortège d'électrons 100 000 fois plus étendu que lui.

Le noyau est lui-même un assemblage de « nucléons » : les protons (identifiés par Rutherford en 1917) et les neutrons (découverts en 1932 par James Chadwick). Par la suite, dans les années 1960, les physiciens ont montré que les nucléons sont constitués de particules élémentaires, les quarks et les gluons. Pour l'essentiel, le proton est composé de deux quarks *u* et d'un quark *d*, tandis que le neutron est l'assemblage de deux quarks *d* et d'un quark *u*. La cohésion entre les quarks est assurée par l'interaction forte, véhiculée par des gluons, dont le nom indique leur fonction de colle entre les quarks.

C'est également l'interaction forte qui colle les nucléons et maintient la cohésion du noyau. En réalité, la description du nucléon fournie par



LES NOYAUX DÉGUISÉS EN MOLÉCULES. Au sein de certains noyaux atomiques, les nucléons (protons ou neutrons) forment des sous-ensembles denses *(en rouge)* liés par l'interaction forte. On parle de « noyaux moléculaires », car ils rappellent les molécules, dont les atomes forment des liaisons électroniques. Ces images résultent de simulations numériques.

la chromodynamique quantique – la théorie qui décrit l'interaction forte – est celle d'une « soupe » d'une multitude de quarks et de gluons en interaction. Du fait de cette complexité, l'interaction forte entre nucléons n'est que partiellement comprise.

Pour compléter ce tableau, il faut ajouter que les protons sont chargés positivement ; par conséquent, la force électromagnétique a une influence dans le noyau. Enfin, les nucléons sont sensibles à l'interaction faible, qui se manifeste par la radioactivité bêta, où, par exemple, la transformation d'un neutron en un proton s'accompagne de l'émission d'un électron et d'une autre particule au caractère élusif, le neutrino.

Un défi mathématique

Ainsi, pour étudier le noyau, il faut prendre en compte trois des quatre forces fondamentales (les interactions forte, faible et électromagnétique, celle restant étant la gravitation) et tous ses nucléons. C'est un grand défi d'ordre mathématique. Pourquoi? Il est assez aisé d'obtenir la description précise d'un système de deux particules en interaction. Il est aussi possible d'étudier statistiquement un système formé d'un très grand nombre d'éléments, un gaz par exemple, et de calculer ses grandeurs thermodynamiques (pression, température, etc.).

Un noyau en forme de poire

a été observé pour la première fois de façon directe en 2013 grâce à l'installation *Isolde* au Cern

Cependant, entre ces deux régimes, pour un noyau formé d'une dizaine ou quelques centaines de nucléons, on ne sait décrire le système ni de façon exacte ni de façon statistique. Par exemple, l'ajout d'un seul nucléon à un noyau en bouleverse les propriétés !

Si la complexité du noyau atomique rend son étude très ardue, elle est aussi la source d'une grande diversité de phénomènes touchant la structure du noyau et sa dynamique. Comment intégrer cette variété dans une description fondamentale et unifiée du noyau atomique ?

Une approche fructueuse est de considérer que le noyau peut présenter différentes phases qui découlent de la compétition entre la nature quantique des nucléons et leurs interactions. D'après le principe de dualité onde-corpuscule, les nucléons présentent à la fois des propriétés d'onde et de particule. Mathématiquement, ils sont décrits par une fonction d'onde qui détermine leur probabilité de présence : selon que cette fonction est concentrée dans l'espace ou étendue, chaque nucléon est plus ou moins bien localisé dans le noyau. Les interactions des nucléons influent directement sur leur localisation. Plus l'interaction d'un nucléon avec ses congénères domine l'agitation des protons et des neutrons, plus la position du nucléon sera bien déterminée.

Dans une étude récente, nous avons considéré deux grandeurs caractéristiques du noyau : la dispersion spatiale des fonctions d'onde des nucléons et la distance moyenne entre ces particules. Le rapport de ces deux caractéristiques – le « paramètre de phase » – nous a permis de définir trois phases dans le noyau : liquide, moléculaire et cristalline. Les nucléons y sont plus ou moins localisés, ce qui influe sur la structure, les propriétés et la forme du noyau.

Ces phases étaient déjà connues, mais leur description faisait appel à des modèles qui coexistaient, sans que l'on puisse les relier. Il est maintenant possible d'appréhender la diversité des phénomènes observés dans les expériences nucléaires par une approche unique et en partie fixée par le paramètre de phase *(voir la figure page ci-contre)*.

Dans la grande majorité des cas, les nucléons formant le noyau s'organisent dans une phase de liquide quantique. Il faut préciser que les nucléons sont des fermions, c'est-à-dire des particules dont le spin – le moment cinétique intrinsèque – est demi-entier (ici 1/2) dans les unités atomiques. Les fermions identiques sont soumis au principe d'exclusion de Pauli qui leur interdit d'être dans un même état quantique.

L'approche phénoménologique du liquide quantique a été introduite par le physicien soviétique Lev Landau en 1956. Dans cette phase, l'interaction des nucléons est importante, mais elle ne suffit pas pour dominer l'agitation de ces derniers. Elle rappelle la phase liquide de la matière ordinaire où les molécules sont en interaction mais où l'agitation thermique reste importante. Comme les interactions des nucléons sont insuffisantes, ceux-ci sont délocalisés dans l'ensemble du volume du noyau. Leurs fonctions d'onde sont très étalées et se recouvrent, ce qui confère au noyau une densité relativement homogène.

De telles propriétés autorisent une description du noyau en termes de ce que l'on nomme le champ moyen : un puits de potentiel commun à tous les nucléons capture l'essentiel de la physique du système de nucléons en interaction. Ainsi, dans cette approche, chaque nucléon subit un même potentiel qui résume l'influence des autres particules.

La forme du potentiel nucléaire moyen n'est pas simple à définir, car il faut prendre en compte les spécificités de l'interaction forte et le fait que les nucléons engendrent eux-mêmes ce potentiel.

Cette approche a permis de décrire de nombreux phénomènes. Le noyau atomique, dans sa phase de type liquide quantique, présente une grande variété de comportements, comme la laisse supposer la malléabilité propre aux liquides. Ainsi, le noyau peut se déformer lorsqu'il est excité et, parfois, même dans son état de plus basse énergie (non excité), il n'est pas sphérique. Il peut alors adopter des formes exotiques, allant de la soucoupe au ballon de rugby en passant par la poire. Cette dernière a été observée pour la première fois (avec un isotope du radium) de façon directe en 2013 grâce à l'installation *Isolde* au Cern. Elle l'a été de nouveau en 2016, avec du barium, par l'équipe de Brian Bucher, du laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, aux États-Unis.

Des liquides quantiques superfluides

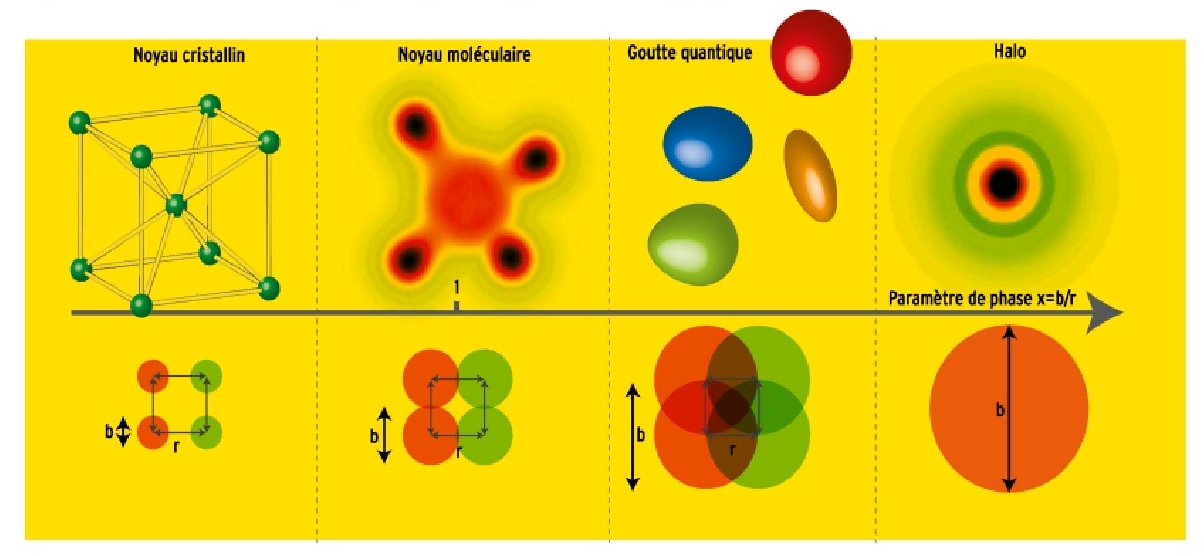
Outre les déformations, le modèle de liquide quantique décrit d'autres propriétés nucléaires. En raison de la nature fermionique des nucléons, on observe dans certains noyaux des corrélations entre deux nucléons. Cela conduit à la formation de paires de fermions, dites de Cooper, et à la superfluidité nucléaire. Ce processus est analogue aux paires de Cooper formées par les électrons dans les métaux supraconducteurs, mécanisme qui conduit à annuler la résistance électrique du matériau. La viscosité du liquide nucléaire diminue drastiquement s'il est superfluide. Cela a un impact sur le moment d'inertie, qui détermine l'énergie du noyau en fonction de sa vitesse de rotation autour de lui-même. Ce phénomène doit être pris en compte lors des mesures en laboratoire.

Dans la phase liquide quantique, le puits de potentiel a une profondeur trop faible pour localiser les nucléons dans le noyau. Le paramètre de phase, le rapport de la dispersion spatiale de la fonction d'onde d'un nucléon et de la distance entre deux nucléons voisins, est alors très supérieur à un. Si le potentiel était profond, les nucléons seraient plus localisés, le paramètre de phase diminuerait et l'on tendrait vers une phase cristalline nucléaire, où les nucléons se situeraient aux mailles d'un réseau, comme dans un cristal.

Cette phase cristalline existe-t-elle dans la nature ? Voyons comment le paramètre de phase peut diminuer. Si le nombre de nucléons du noyau augmente, la profondeur du puits de potentiel augmente et le paramètre de phase diminue. Mais on obtient rapidement un effet de saturation, conséquence de la courte portée des forces s'exerçant entre les nucléons : la profondeur du puits de potentiel atteint une valeur limite quasi indépendante du noyau considéré. Par ailleurs, on montre que la dispersion spatiale de la fonction d'onde augmente avec le nombre de nucléons. Finalement, un noyau riche en nucléons aura un comportement de liquide quantique et un paramètre de phase supérieur à 1.

Un noyau léger ne contient pas suffisamment de nucléons pour former une structure cristalline. Cet état ne semble donc pas possible dans un noyau atomique. En revanche, il pourrait exister dans l'écorce des étoiles à neutrons. Prédites peu après la découverte du neutron dans les années 1930, ces étoiles sont restées hypothétiques jusqu'à ce que, en 1967, Jocelyn Bell, une doctorante, découvre les pulsars, caractérisés par une émission radio d'une période allant de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes. Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide émettant un jet qui balaie l'espace de façon

ON CLASSE la grande diversité de structures qu'adoptent les noyaux atomiques grâce au paramètre de phase. Ce paramètre est le rapport de deux longueurs : l'étalement de la fonction d'onde décrivant l'état quantique de chaque nucléon *(b)* et la distance moyenne entre nucléons *(r)*. Dans le quatrième cas, à droite, il n'y qu'un seul nucléon, donc pas de *r*.



périodique, comme un phare. On en a observé quelques milliers à l'heure actuelle.

De masse comparable à celle du Soleil mais avec un rayon d'une dizaine de kilomètres, les étoiles à neutrons sont parmi les objets les plus denses de l'Univers : un centimètre cube d'un tel astre pèse environ 100 millions de tonnes. Cette densité extrême est comparable à celle des noyaux atomiques.

Un centimètre cube de la matière d'une étoile à neutrons pèse environ 100 millions de tonnes.

Ce lien entre la physique du noyau et l'astrophysique conduit à modéliser les étoiles à neutrons comme des sortes de noyaux géants. Or on calcule que les effets gravitationnels très intenses imposent dans les couches externes de ces étoiles une densité qui conduit à l'apparition de cristaux nucléaires.

Ces étoiles pourraient héberger d'autres formes exotiques de la matière. Leur écorce présente une structure cristalline tandis que le noyau interne est décrit comme un liquide quantique nucléaire de plusieurs kilomètres de rayon. Entre ces deux régions, il existerait une phase hybride de type « molécule nucléaire ». Cette phase se caractérise par une dispersion de la fonction d'onde des nucléons du même ordre de grandeur que la distance moyenne qui les sépare (le paramètre de phase vaut environ 1).

Cette phase moléculaire existe aussi dans certains noyaux formés de quelques dizaines de nucléons. Ces noyaux gagnent en stabilité lorsque les nucléons se regroupent en agrégats, chacun formant une particule α (deux protons et deux neutrons).

Des molécules de noyaux

Ces noyaux moléculaires rappellent les molécules classiques constituées d'atomes, à la différence que les noyaux moléculaires sont 100 000 fois plus petits. En outre, les noyaux ayant peu de protons, mais un excédent de neutrons, ils développent facilement une structure en agrégats : les neutrons excédentaires, faiblement liés, se délocalisent entre les agrégats et jouent le même rôle stabilisateur que les électrons dans les liaisons de valence entre les atomes d'une molécule.

L'idée d'un noyau structuré en agrégats de nucléons remonte aux années 1930, quand les physiciens américains Lawrence Hafstad et Edward Teller ont proposé que les noyaux de béryllium 8, carbone 12, oxygène 16 et néon 20, qui ont autant de protons que de neutrons, pouvaient être décrits par des assemblages de particules α.

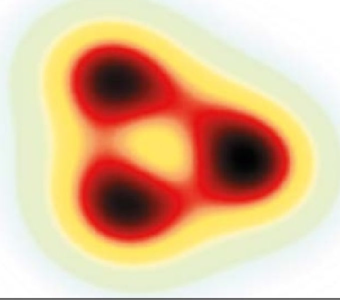
L'état de Hoyle, la clé du noyau de carbone

Quelques minutes après le Big Bang, à des températures de l'ordre de quelques milliards de degrés, les protons et les neutrons ont fusionné pour former de l'hydrogène, du deutérium (un isotope de l'hydrogène avec un neutron), de l'hélium et des traces de lithium 7. C'est la « nucléosynthèse primordiale ». Aucun noyau doté de cinq ou huit nucléons n'est suffisamment stable pour que ce processus de fusion se poursuive vers les noyaux plus lourds. Ainsi, la fusion de deux noyaux d'hélium échoue. La nucléosynthèse primordiale du Big Bang s'arrête à ce niveau.

Les éléments plus lourds, tel le carbone, se forment bien plus tard dans les étoiles, qui présentent des températures et des densités élevées. La densité peut y être cent fois plus importante que dans l'Univers au moment de la nucléosynthèse primordiale. L'hydrogène est le combustible principal. L'énergie libérée lors de la fusion de noyaux crée une pression de radiation qui s'oppose à l'effondrement gravitationnel de l'étoile. L'hydrogène est progressivement consommé et remplacé par de l'hélium. Mais quand l'hydrogène vient à manquer, la contraction de l'étoile reprend. La densité augmente et la fusion de l'hélium peut avoir lieu. Deux noyaux d'hélium fusionnent pour donner un noyau de béryllium 8, lequel fusionne à son tour avec un noyau d'hélium, ce qui donne un noyau de carbone 12. C'est la réaction dite triple α (car le noyau d'hélium est aussi nommé particule α).

Cette réaction est *a priori* peu probable, car le béryllium 8 est très instable et se désintègre la plupart du temps avant qu'une troisième particule α n'interagisse et fusionne avec lui. Un premier facteur facilite néanmoins cette réaction : l'état fondamental du béryllium 8 a quasiment la même énergie que deux particules α. Cela permet donc de produire facilement du béryllium 8, mais cela ne suffit pas pour produire du carbone 12.

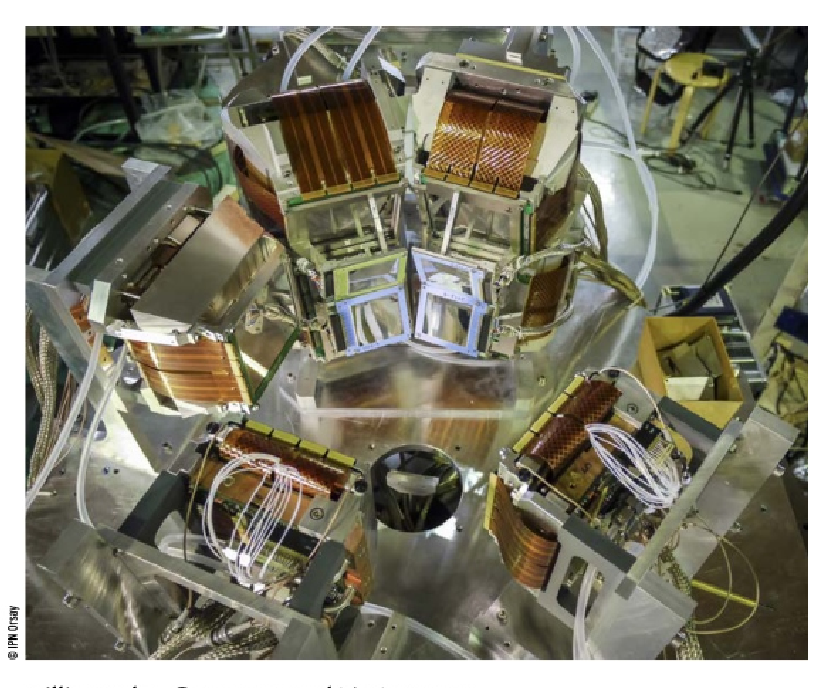
En 1954, le physicien anglais Fred Hoyle a alors fait un raisonnement étonnant. Puisque nous observons du carbone dans l'Univers, la réaction triple α doit avoir lieu, donc le carbone 12 doit nécessairement présenter un état excité formé de trois particules α (dit état de Hoyle) dont l'énergie serait quasi égale à celle d'un atome de béryllium 8 et d'une particule α, ce qui faciliterait cette fusion (l'existence de cet état excité augmente la probabilité de formation du carbone 12). Cet état moléculaire n'a été mis en évidence que quelques mois après la prédiction de Hoyle. L'état excité est néanmoins instable et se décompose la plupart du temps en béryllium. Mais une fois sur 2 500, le noyau se désexcite sans se désintégrer et forme un noyau stable de carbone 12. Cela ouvre ensuite la voie à la formation de l'oxygène et tous les éléments plus lourds.



© J.-P. Ebran

L'ÉTAT DE HOYLE est un noyau de carbone 12 excité, qui constitue un état moléculaire où les nucléons se regroupent en formant trois particules α.

LA PLUS ÉTONNANTE PHASE NUCLÉAIRE est celle du noyau moléculaire, où les nucléons se regroupent en particules α (états liés de deux protons et deux neutrons). Ce serait le cas pour le carbone 12, qui contiendrait trois particules α, ou le néon 20, qui en contiendrait cinq. Le dispositif MUST2 *(ci-contre)* au Ganil, à Caen, détecte ces particules α que les noyaux de ce type émettent plus facilement que les autres.


© IPN Orsay

Il faudra attendre les années 1960 pour voir l'élaboration des premiers outils théoriques dédiés à leur description et la mise en place d'expériences les révélant. C'est ainsi que l'on découvrit que les noyaux légers ayant un nombre égal de protons et de neutrons ont tendance à exhiber des agrégats de nucléons dans leurs états excités.

L'existence du carbone 12 est la meilleure preuve que certains noyaux sont dans la phase moléculaire *(voir l'encadré page ci-contre)*. La synthèse de cet élément dans les étoiles passe par une réaction clé: la fusion de trois particules α qui produit un état excité, décrit comme un état moléculaire de trois particules α et nommé état de Hoyle. Sans la formation de cet état excité, la synthèse du carbone, de l'oxygène et de tous les éléments plus lourds serait bloquée.

Le halo: des neutrons très délocalisés

Notre approche fondée sur le paramètre de phase a permis de classer un grand nombre de configurations nucléaires selon trois phases. Ainsi, les noyaux riches en nucléons forment des liquides quantiques, tandis que les noyaux légers présentent parfois un comportement moléculaire.

Cependant, les noyaux atomiques peuvent se trouver dans d'autres états exotiques, tels les halos. En 1985, Isao Tanihata et ses collègues ont mesuré le rayon de plusieurs noyaux légers au laboratoire Lawrence Berkeley, aux États-Unis. Le lithium 11 a un diamètre comparable à celui du plomb 208, alors qu'il a vingt fois moins de nucléons. Ce noyau est doté d'un halo formé par deux neutrons très délocalisés. D'autres noyaux riches en neutrons exhibent aussi une structure de halo.

Cette délocalisation de la fonction d'onde de certains nucléons dans les noyaux à halo provient de leur faible énergie de liaison. Plusieurs observations directes de noyaux à halo ont été réalisées dans différents laboratoires dans le monde, comme au Ganil (Grand accélérateur national d'ions lourds) en France. L'état de halo s'intègre dans notre description unifiée des divers états nucléaires. Il serait un cas extrême de délocalisation de la fonction d'onde de certains nucléons.

La difficulté expérimentale pour étudier de nouvelles formes nucléaires est qu'elles apparaissent dans des noyaux instables, dont la durée de vie est de l'ordre de quelques nanosecondes à quelques millisecondes. Ces noyaux se désintègrent en effet rapidement par interaction faible. Il en est ainsi pour les noyaux bulles, sortes de noyaux creux prédits par les théoriciens. La déplétion de matière en leur cœur est due à un effet spécifiquement quantique: la probabilité de présence des protons au centre du noyau est très faible – un effet surprenant, le cœur des noyaux atomiques étant en général ultradense.

Cet état serait un cas particulier des liquides quantiques. Certains indices expérimentaux de l'existence de noyaux bulles ont récemment été obtenus au Ganil. La prochaine étape consiste à mettre en évidence de façon directe le creux de matière au sein de ces noyaux, dont un candidat est le silicium 34 instable.

Les noyaux instables représentent 95 % des édifices nucléaires connus, alors que les noyaux stables, tel celui de l'oxygène que nous respirons, n'en constituent que 5 %. La physique nucléaire du XXe siècle a été marquée par l'étude des 300 noyaux stables et a ouvert la voie à l'étude des noyaux instables. Les expériences de notre siècle s'orientent vers une étude systématique de ces derniers, qui se comptent par milliers. Les installations les plus récentes (ou en construction) au Japon, aux États-Unis et en Europe (France, Allemagne, Cern) permettront de se rapprocher de la limite théorique d'existence des noyaux, dont on estime le nombre total à environ 7 000.

Nous découvrirons alors peut-être de nouveaux états de la matière qui nécessiteront d'affiner nos modèles, voire des formes et états que les physiciens n'ont pas encore imaginés.

articles

- **B. BUCHER *et al.* Direct evidence of octupole deformation in neutron-rich ^{144}Ba, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, 112503, 2016.**
- **J.-P. EBRAN *et al.*, Density functional theory studies of cluster states in nuclei, *Physical Review C*, vol. 90, 054329, 2014.**
- **G BURGUNDER *et al.*, Experimental study of the two-body spin-orbit force in nuclei, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 042502, 2014.**
- **L. P. GAFFNEY *et al.*, Studies of pear-shaped nuclei using accelerated radioactive beams, *Nature*, vol. 497, pp. 199-204, 2013.**
- **J.-P. EBRAN *et al.*, How atomic nuclei cluster, *Nature*, vol. 487, pp. 341-344, 2012.**
- **J. ERLER *et al.*, The limits of the nuclear landscape, *Nature*, vol. 486, pp. 509-512, 2012.**

Alexia Auffèves

« Libérons le chat de Schrödinger ! »

La mécanique quantique entretient depuis ses débuts des rapports controversés avec l'idée de réalité : c'est le débat entre Einstein et Bohr. Aujourd'hui, une nouvelle façon d'envisager la réalité tente de les réconcilier. Certaines images célèbres n'y résistent pas.

Historiquement, quels liens entretient la mécanique quantique avec la réalité ?

Alexia Auffèves : On peut les décrire par une ligne de démarcation entre le réalisme et l'antiréalisme. Cette frontière sépare deux façons d'envisager la réalité, c'est-à-dire deux visions des choses telles qu'elles sont – on parle d'ontologie, par opposition à ce que l'on peut dire des choses (l'épistémologie).

Dans le cadre de la physique classique, les choses sont plutôt simples. L'observation d'un objet est innocente, dans le sens où elle ne change pas l'état de cet objet.

Après l'avènement de la physique quantique, l'observation perd sa neutralité. L'exemple du microscope de Heisenberg en est une illustration. Quand l'objet étudié est très petit, un photon envoyé pour détecter sa position la modifie à cause du choc. Ainsi, à l'échelle quantique, une sorte de voile fondamental serait jeté sur les choses : petites, elles réagissent trop violemment dès que j'essaie d'en apprendre un peu sur leur état.

À partir de cet exemple, deux camps se sont opposés. Le premier, celui d'Einstein, réunit ceux pour qui l'état du petit objet observé avec le photon existe bien, seules des raisons pratiques empêchent de l'atteindre. Cette position a historiquement été qualifiée de réaliste. Je trouve que c'est une vision très frustrante, puisqu'on est obligé de parler d'objets qu'on ne peut pas décrire entièrement.

L'autre camp, celui de Bohr, est dit positiviste ou antiréaliste. Selon ses partisans, ça n'a aucun sens de parler de l'état d'un objet qui soi-disant existe, mais reste inaccessible. On doit aussi inclure la façon dont on l'observe dans la description. En conséquence, la réalité devient très lourde, parce qu'elle se réfère au système étudié, mais également au contexte expérimental, notamment l'appareillage utilisé pour caractériser l'état du système.

Comment a évolué ce débat ?

Alexia Auffèves : Il s'est forgé dans les années 1930 et est resté en l'état pendant plusieurs années, parce qu'il relevait essentiellement de la métaphysique. La situation a changé en 1964 quand le physicien John Stewart Bell a établi un critère mesurable pour trancher entre les deux visions. On passait donc de la métaphysique à la physique ! Les expériences ont été faites à partir de 1979 et surtout en 1982, par le physicien français Alain Aspect. Les quelques failles qui restaient à combler pour que l'interprétation fasse consensus l'ont été en 2015 *(voir l'article Le débat Einstein-Bohr est complètement clos de A. Aspect, page 22)*. Voilà ce qu'il en est de l'histoire.

Où vous positionnez-vous ?

Alexia Auffèves : Je travaille sur ces idées avec le physicien Philippe Grangier, du laboratoire Charles Fabry (CNRS Institut d'optique Graduate School univ. Paris-Sud), et la philosophe Nayla Farouki, du CEA, à Grenoble. Grâce à elle, nous avons pu traduire notre réflexion en termes philosophiques impliquant les mots-clés d'ontologie et d'épistémologie. Avec le bagage essentiel qu'elle nous a apporté, nous avons pu relire Bohr.

On a souvent reproché à ce dernier son refus d'aller chercher plus loin que ce que l'expérience voulait bien lui donner. Sa vision des choses a été qualifiée de positiviste de façon un peu méprisante, parce qu'elle réduirait la mécanique quantique à une série de « recettes de cuisine » qui fonctionnent sans que l'on ait à se soucier de la réalité sous-jacente.

Que proposez-vous ?

Alexia Auffèves : Le réalisme et l'antiréalisme que l'on oppose sont en quelque sorte la thèse et l'antithèse d'une dissertation de philosophie. Nous proposons une synthèse où le reproche fait à Bohr de ne s'occuper que des résultats d'expérience sans creuser la nature de la réalité profonde est infondé.

Schématiquement, notre stratégie consiste à déconstruire notre notion de la réalité, à reconnaître que nous sommes « pétris » de classicité, et à reconstruire une notion de réalité qui finalement réhabilite Bohr en en faisant un réaliste.

Entrons dans le détail du processus par lequel s'édifie la notion de réalité en physique. D'abord, on isole un objet d'étude, par exemple une table, puis on tente de le caractériser. Dans le monde classique, et plus largement dans notre expérience quotidienne, cette étape se déroule de façon inconsciente par une série de questions posées : « De quelle couleur est l'objet ? », « Quelles sont ses dimensions ? »... De la sorte, notre cerveau élabore une « carte d'identité », de nature opérationnelle et phénoménologique. Les réponses obtenues ne dépendent ni du nombre de questions, ni de leur ordre.



Bio express

1976 **Naissance à Lyon.**

2004 **Soutient sa thèse de doctorat de physique quantique expérimentale sur les chats de Schrödinger et la frontière classique-quantique.**

2011 **Avec Nayla Farouki, lancement d'un groupe dédié aux fondements de la mécanique quantique à Grenoble.**

2013 **Formation du trio Auffèves/Farouki/Grangier sur l'ontologie CSM.**

Toujours inconsciemment, nous sommes conduits à nous dire qu'il y a quelque chose de tangible, de solide derrière cet objet étudié.

Plus encore, quand les questions sont répétées, les réponses sont toujours identiques. De là, une conviction s'établit en nous, transformant la carte d'identité en un état. On passe de la phénoménologie à l'ontologie de façon complètement inconsciente. Ainsi se construit l'intuition que les propriétés sont des « états » qui appartiennent aux objets.

Tout change dans le monde quantique...

Alexia Auffèves: Oui, notamment parce que l'ordre des questions posées influe sur les réponses, et donc sur la carte d'identité. Prenons l'exemple d'un photon polarisé. Je peux choisir deux bases pour mesurer cette polarisation avec un analyseur soit : horizontale/verticale (H/V), soit 45/135 degrés (D/A, pour diagonal et antidiagonal).

Dans la base H/V, un photon avec une polarisation verticale V est toujours transmis, avec une polarisation horizontale H, il est toujours réfléchi, et avec une polarisation à 45 degrés, il est transmis dans la moitié des cas et réfléchi dans l'autre moitié.

On souhaite ensuite établir la carte d'identité du photon. De même qu'avec la table (de façon un peu moins inconsciente), je lui pose des questions. Commençons avec: «Es-tu orienté H ou V?» Dans la base H/V, j'obtiens une première réponse, et j'aurai la même autant de fois que je poserai la question sans changer de base. On peut donc extraire une information. Je peux ensuite changer de question et l'interroger: «Es-tu orienté à 45 ou 145 degrés?». En tournant simplement l'analyseur pour installer la base D/A, on change le contexte expérimental. Après avoir obtenu une réponse à cette nouvelle question, on peut retourner à la base précédente (H/V), et cette fois, la réponse ne sera pas nécessairement la même qu'avant. C'est un phénomène bien connu en mécanique quantique, dû au fait que les deux bases ne commutent pas. Ici, l'ordre des questions importe.

Que devient alors le passage de la carte d'identité à l'état?

Alexia Auffèves: Nous avons vu que dans le monde classique, la carte d'identité peut devenir un état, ce qui est ontologiquement plus fort qu'une carte d'identité puisqu'il est plus «solidement» attaché à l'objet. C'est parce que dans ce cadre, l'ordre des questions n'a aucune importance pour établir la carte d'identité. En revanche, en physique quantique, ce n'est pas le cas, le passage de la carte d'identité à l'état est donc interdit.

Avec Philippe Grangier et Nayla Farouki, nous allons plus loin que la vision réaliste d'Einstein en proposant de construire sur ce dont on dispose, là où on peut avoir des certitudes. Or nous avons vu qu'une question identique répétée dans un contexte identique conduit toujours à la même réponse. La transformation de la carte en état devient donc possible à condition de prendre en compte, en plus du système étudié (le photon), le contexte expérimental (l'analyseur).

C'est le premier postulat que nous posons dans notre nouvelle façon d'envisager la réalité et que nous nommons Contexte, Système, Modalité (CSM). Exprimé autrement, il signifie qu'en mécanique quantique, l'état d'un système ne dépend pas que du système lui-même, mais aussi du contexte. Pour bien distinguer ces états qui caractérisent système et contexte des états classiques qui ne dépendent que du système, nous les avons baptisé « modalités ». Ces modalités sont des réponses certaines, prédictibles et répétées à des questions posées dans un contexte donné. Ce premier postulat est en fait une reformulation des idées de Bohr en termes ontologiques.

Nous pouvons le faire parce que nous nous appuyons sur près d'un siècle d'expériences qui ont confirmé ce qui paraissait probablement trop révolutionnaire au départ. La physique

quantique a prouvé son efficacité et toutes les tentatives élaborées pour en interpréter le formalisme en termes classiques ont échoué. Aujourd'hui, avec la maturité acquise, nous sommes prêts à nous réapproprier la notion de réalité et à la revisiter, mais en tenant compte de la phénoménologie quantique.

Que devient ce principe de réalité quand la taille de l'objet augmente ?

Alexia Auffèves : Pour répondre, je dois d'abord indiquer notre deuxième postulat, qui est plus original, du moins par rapport à Bohr. Il consiste à dire que pour un système donné le nombre de modalités est fini. En termes de questions et de réponses, ce postulat de quantification signifie que, pour un petit système quantique, le nombre de réponses qu'il peut fournir quel que soit le contexte est fini et discret. Ce nombre est le même pour tous les contextes possibles et caractérise uniquement le système. Par exemple, quelle que soit la base d'analyse, la seule alternative du photon est d'être transmis ou réfléchi (ce qui correspond à deux modalités).

En mécanique quantique, les physiciens travaillent avec des objets de plus en plus petits jusqu'à des objets ultimes – des systèmes quantiques – pour lesquels s'applique ce postulat de quantification.

On peut agréger ces petits objets ultimes pour en faire des objets de plus en plus gros, dont les propriétés pourront être mesurées dans un contexte approprié, avec un nombre de modalités accessibles qui augmentera en conséquence. En revanche, et contrairement à beaucoup d'autres approches, un « gros » système quantique ne saurait absorber le contexte, qui est toujours déjà là et fait partie intégrante de notre ontologie.

Quels sont les meilleurs atouts de l'ontologie CSM ?

Alexia Auffèves : Ce qui me séduit le plus est l'explication du hasard. Cet aspect, essentiel en mécanique quantique, est absent des autres approches ou bien abordé de façon frustrante. Ainsi, dans l'exemple du microscope de Heisenberg, de façon un peu caricaturale, les résultats de la mécanique quantique sont probabilistes, car la mesure perturbe le système et empêche d'accéder à l'état.

Dans l'approche CSM, le hasard devient une conséquence du postulat de la quantification selon lequel, rappelons-le, un système n'a droit qu'à un nombre fini de réponses dans un contexte donné. Reprenons le cas du photon. À une question dans la base H/V, il ne peut fournir que deux réponses possibles, H ou V : il n'a droit qu'à deux modalités.

Maintenant, essayons d'obtenir une autre réponse dans une autre base. Pour ce faire, je pose une autre question en changeant l'orientation de l'analyseur en position A/D. Cette fois, je n'aurai pas de réponse certaine, car sinon, dans un tel cas j'aurais quatre séries de réponses certaines (des modalités) possibles, en l'occurrence HA, HD, VA, VD. Ce cas de figure est en contradiction avec le postulat de quantification, qui n'autorise que deux modalités pour le photon quel que soit le contexte.

Ainsi, l'aspect aléatoire qui surgit lorsque je change le contexte expérimental est vraiment dû au postulat de quantification. C'est extrêmement satisfaisant de voir qu'une des caractéristiques essentielles de la mécanique quantique – son aspect aléatoire – résulte d'une quantification. En d'autres termes, on remet de la quantification au cœur de la mécanique quantique...

Que devient le chat de Schrödinger ?

Alexia Auffèves : Cette question est celle de la superposition cohérente d'état. Or dans notre approche, une superposition cohérente est simplement l'outil mathématique utilisé pour décrire une modalité qui est une certitude dans un autre contexte. C'est encore une fois à rapprocher de l'idée que les états ne sont pas rattachés au système seul, mais caractérisent à la fois des systèmes et des contextes. Mais dans l'ontologie classique où les états caractérisent seulement les systèmes, une façon sensationnaliste de décrire une superposition cohérente est de dire que le système est « à la fois » dans deux états différents : le photon est « à la fois » H et V, le chat est « à la fois mort et vivant »...

Dans l'exemple du photon, prenons-en un polarisé à 45 degrés. Lorsque je l'observe dans la base H/V, j'ai 50 % de chances de le détecter dans la position H et autant en position V. En termes sensationnalistes, ce photon est dans une superposition cohérente d'états H et V. Expérimentalement, cela signifie simplement qu'avec un analyseur tourné à 45 degrés, j'aurai une certitude de voir mon photon transmis.

Si on considère maintenant le chat de Schrödinger, il est raisonnable d'admettre qu'on puisse décider avec certitude, dans le monde usuel utilisé comme contexte, si le chat est mort ou vivant. Mais quel serait le contexte dans lequel on pourrait décider avec certitude que le chat est « à la fois » mort et vivant, dans le même sens qu'un photon polarisé à 45 degrés est « à la fois » H et V ? On peut certes écrire des formules mathématiques, mais ces formules sont dénuées de sens en l'absence d'un contexte où elles seraient des modalités.

Aujourd'hui, les physiciens construisent des superpositions quantiques d'objets de plus en plus « gros », par exemple avec de la lumière ou des microondes. Mais ces expériences sont extrêmement difficiles à réaliser, tout le problème étant précisément de réaliser des contextes où on pourra vérifier que les superpositions envisagées sont bien des modalités. Avec un chat, on est loin du compte ! Libérons-le donc de la machine infernale dans laquelle Schrödinger l'avait enfermé !



« Grâce à notre approche de la réalité quantique, nous démystifions l'idée des superpositions cohérentes. En d'autres termes, nous proposons de libérer le chat de Schrödinger ! »

Propos recueillis par Loïc MANGIN



GRENOBLE SCIENCES
CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION
COLLECTION GRENOBLE SCIENCES
DIRIGÉE PAR JEAN BORNAREL
PHYSIQUE ATOMIQUE ET SPECTROSCOPIE OPTIQUE
Michel MOISAN - Danielle KÉROACK - Luc STAFFORD
edp sciences
Pour celles et ceux qui utilisent la spectroscopie optique
... et d'autres titres sur des thèmes corrélés
LA SPECTROSCOPIE DE RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE
FONDEMENTS
Patrick BERTRAND
LA SPECTROSCOPIE DE RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE
APPLICATIONS
Patrick BERTRAND
SPECTROSCOPIES INFRAROUGE ET RAMAN
René POILBLANC et François CRASNIER
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE
PROBLÈMES CORRIGÉS
TOME 2
Neutron and X-ray Spectroscopy
F. Hippert - E. Geissler - J.L. Hodeau
E. Lelièvre-Berna - J.R. Regnard
PLASMAS COLLISIONNELS
PHYSIQUE DES DÉCHARGES RF ET MICRO-ONDE
Michel MOISAN et Jacques PELLETIER
Atomic Properties in Hot Plasmas
From Levels to Superconfigurations
J. Bauche, C. Bauche-Arnoult, O. Peyrusse
Springer
DESCRIPTION DE LA SYMÉTRIE
DES GROUPES DE SYMÉTRIE AUX STRUCTURES FRACTALES
Jean SIVARDIÈRE
LA MÉCANIQUE QUANTIQUE
PROBLÈMES CORRIGÉS
TOME 1
V.M. GALITSKI, B.M. KARNAKOV, V.I. KOGAN
www.grenoble-sciences.fr
GRENOBLE SCIENCES
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes
POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet : laboutique.edpsciences.fr
Grenoble Sciences, Université Grenoble Alpes, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – CS 40700 38058 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr
AUVERGNE – RhôneAlpes

NIELS BOHR ET ALBERT EINSTEIN dans la maison de Paul Ehrenfest, à Leyde, en 1925, à l'époque où ils discutaient de la mécanique quantique et de son interprétation.

Le débat **Einstein-Bohr** est complètement clos

Trois expériences récentes effacent les derniers doutes : nous devons bien renoncer à l'idée de réalisme local en physique quantique. Elles ouvrent aussi la porte aux nouvelles technologies de l'information quantique.

Alain ASPECT
est chercheur et professeur à l'Institut d'optique graduate school (CNRS, université Paris-Saclay), et professeur à l'École polytechnique, à Palaiseau.

En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen publient un article désormais célèbre intitulé : « La description de la réalité physique par la mécanique quantique est-elle complète ? » Les auteurs y présentent le raisonnement EPR qui remet en cause le caractère complet du formalisme de la mécanique quantique. Ce qui les gène ? L'idée d'une possible influence voyageant plus vite que la lumière.

Plus précisément, ils rejettent l'idée qu'une mesure sur une particule d'une paire intriquée puisse influer sur l'état de l'autre particule, même très éloignée. Ils en concluent que l'on doit compléter le formalisme quantique si l'on veut obtenir une description raisonnable, « réaliste locale », du monde. Selon ce point de vue, une particule porte en elle, localement, les paramètres déterminant le résultat de toute mesure effectuée sur elle, l'ensemble de ces propriétés constituant la réalité physique de la particule. Des expériences récentes, qui couronnent plusieurs décennies d'efforts théoriques et expérimentaux, confirment que nous devons renoncer à cette vision du monde. Remontons le cours de l'histoire.

Einstein et la physique quantique

On oublie souvent qu'Einstein a joué un rôle majeur dans le développement initial de la physique quantique. Il a ainsi été le premier à bien comprendre les conséquences de la quantification de l'énergie des oscillateurs harmoniques et, après avoir introduit l'idée de « quanta de lumière » en 1905, il énonça dès 1909 la dualité onde-particule de la lumière.

Après une incroyable série de travaux pionniers visionnaires, entre 1905 et 1924 *(voir les livres de Thibault Damour et de A. Douglas Stone)*, il se montra de plus en plus insatisfait de l'interprétation de Copenhague élaborée par Niels Bohr. Il chercha par exemple une incohérence dans les relations d'incertitude de Heisenberg, qui font des probabilités une clé du monde quantique. Toutefois, au congrès Solvay, en 1927, Bohr démonta les arguments d'Einstein, basés sur d'ingénieuses expériences de pensée portant sur des particules quantiques uniques.

Mais en 1935, Einstein formule une nouvelle objection, sous la forme d'une expérience de pensée impliquant cette fois deux particules. Il découvre que deux particules quantiques peuvent être intriquées, dans un état où le formalisme prédit de fortes corrélations entre des mesures sur chacune d'elle. Ces corrélations persistent même quand ces particules sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour qu'aucune influence ne puisse les connecter, à moins que cette influence ne se propage plus vite que la lumière. Einstein en déduit ce qu'il pense être la plus raisonnable des explications de ces corrélations : chaque particule est dotée d'une propriété, acquise au moment de la séparation, et qui détermine le résultat de la mesure sur cette particule. Si les propriétés de départ sont identiques, on comprend que les résultats soient corrélés. Mais dans l'état intriqué le formalisme quantique n'attribue pas de propriété individuelle à chaque particule, et Einstein en conclut que ce formalisme est incomplet. Bohr s'oppose immédiatement à cette conclusion, convaincu qu'on ne peut pas compléter le formalisme quantique sans détruire sa logique interne *(voir l'entretien avec A. Auffèves, page 18)*.

À l'exception notable d'Erwin Schrödinger, la plupart des physiciens ne prêtèrent guère d'attention au débat entre Bohr et Einstein, puisque le débat ne portait que sur l'interprétation du formalisme quantique, et non sur son aptitude à prédire correctement les résultats des expériences, aptitude qu'Einstein ne remettait pas en cause. La situation changea en 1964 quand John Stewart Bell, physicien de la prestigieuse division théorique du Cern, fit une découverte majeure : certaines prédictions du formalisme quantique entrent directement en conflit avec une vision réaliste locale du monde.

Pour comprendre ce résultat de Bell, considérons la figure page suivante, qui correspond à des expériences réelles. Deux photons sont émis dans des directions différentes, et lorsqu'ils sont suffisamment éloignés l'un de l'autre, on effectue sur chacun une mesure de polarisation. Si on prépare les deux photons dans un état intriqué bien choisi, la mécanique quantique prédit que les résultats des mesures de polarisation seront fortement corrélés. Afin de rendre compte de ces corrélations à distance, Bell développe un modèle réaliste local très général, dans lequel une propriété commune, acquise par chaque photon de la paire au moment de l'émission, déterminera le résultat de chaque mesure. Il découvre alors que dans ce formalisme les corrélations ne peuvent dépasser certaines valeurs, elles sont soumises à des inégalités aujourd'hui appelées inégalités de Bell. Or les corrélations prédites par le formalisme quantique dépassent ces limites, pour certaines orientations des polariseurs. Ainsi, il y a un conflit entre les prédictions de la mécanique quantique et le réalisme local : nous sommes au-delà d'une question d'interprétation, il s'agit d'une divergence quantitative.

Les travaux de Bell ont donc déplacé le débat entre Einstein et Bohr du domaine de l'épistémologie vers celui de la physique expérimentale. En quelques années, les inégalités de Bell ont été adaptées à un schéma opérationnel. Les premières expériences ont été menées en 1972, à Berkeley et à Harvard, puis, en 1976, à l'université Texas A&M à College Station. Après quelques divergences, les résultats ont convergé vers un accord avec la mécanique quantique, violant les inégalités de Bell par plus de 5 écarts-types (c'est-à-dire l'expression quantitative de l'incertitude sur la mesure. Une différence de 5 écarts-types est considérée comme tout à fait convaincante par les

L'ESSENTIEL

- Albert Einstein et Niels Bohr s'opposaient quant à l'interprétation du formalisme quantique, qui était pour le premier nécessairement incomplet.
- John Stewart Bell élabora en 1964 des inégalités qui permettaient de trancher le débat de façon expérimentale.
- Plusieurs expériences ont été effectuées dans les décennies suivantes, mais toutes souffraient d'échappatoires qui empêchaient de conclure.
- Ce n'est qu'en 2015 que trois nouvelles expériences ont enfin pu clore le débat Einstein-Bohr, au profit du second.

physiciens professionnels, puisque la probabilité que le résultat soit dû à une fluctuation aléatoire est alors inférieure à 0,0003 %).

Fermer les échappatoires

Ces expériences étaient de véritables tours de force, mais elles étaient loin d'être idéales. On pouvait invoquer des échappatoires, permettant à un avocat déterminé du point de vue d'Einstein d'interpréter ces expériences avec un formalisme réaliste local. La première échappatoire – et selon beaucoup de physiciens dont Bell, la plus fondamentale – est liée à la localité. Pour démontrer ses inégalités, Bell doit supposer que la mesure à l'un des analyseurs (un polariseur qui détecte la polarisation d'un photon) ne dépend pas de l'orientation de l'autre. Cette condition de localité est très raisonnable, mais dans un débat où l'on envisage des phénomènes nouveaux, inconnus, il vaut mieux baser cette condition sur une loi fondamentale de la nature.

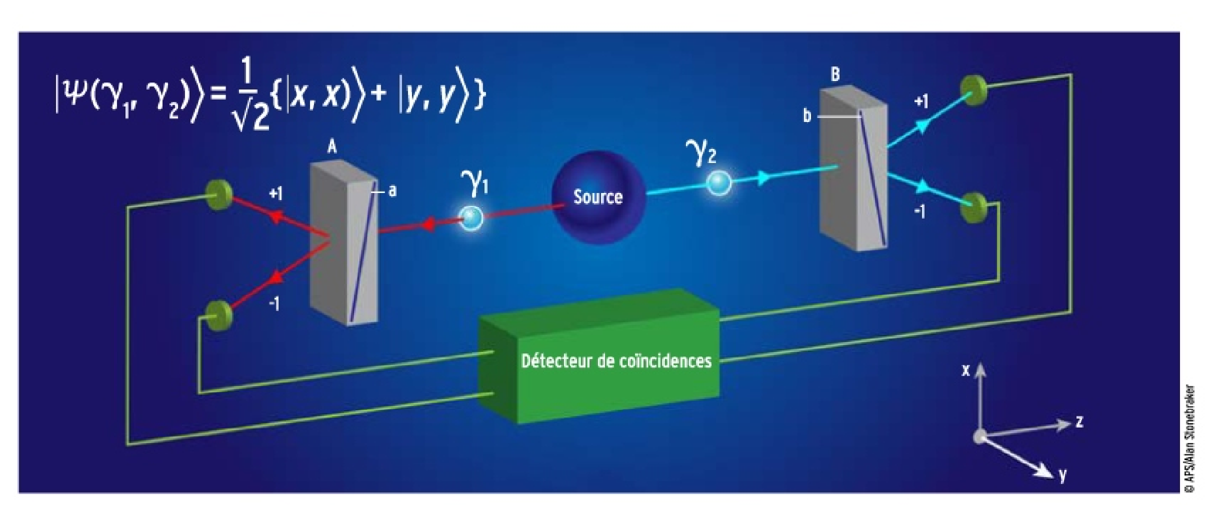
En fait, Bell propose un moyen de le faire. Il remarque que si l'orientation de chaque analyseur est choisie pendant la propagation des photons, alors le principe de causalité relativiste (qui postule qu'aucune influence ne peut voyager plus vite que la lumière) empêche chaque analyseur de « connaître » l'orientation de l'autre au moment de la mesure : l'échappatoire de localité sera alors fermée.

C'est précisément ce que nous avons fait en 1982 à l'Institut d'optique, dans une expérience où l'orientation des analyseurs est modifiée pendant le trajet des photons. Dans ce schéma expérimental radicalement nouveau, les résultats s'accordaient encore avec les prédictions quantiques, les inégalités de Bell étant violées par 6 écarts-types. Mais, en raison des limitations techniques de l'époque, le choix de l'orientation des analyseurs n'était pas strictement aléatoire. Et en 1998, une équipe de l'université d'Innsbruck, en Autriche, a surmonté ce problème en utilisant un générateur de nombres aléatoires et observé une violation des inégalités de Bell par plusieurs dizaines d'écarts-types.

Il restait une deuxième échappatoire, tenant au fait que les paires de photons détectées ne constituent qu'une petite fraction de celles émises. Cette fraction pourrait dépendre des réglages des analyseurs, et pour démontrer les inégalités de Bell il faut faire l'hypothèse raisonnable que ce n'est pas le cas, et que les paires détectées constituent un « échantillon non biaisé » de l'ensemble des paires. Pour fermer cette échappatoire, dite de détection, et s'affranchir de l'hypothèse d'échantillon non biaisé, il faut remplir une condition particulièrement exigeante : la probabilité conditionnelle de détecter un photon, lorsque son partenaire a été détecté, doit être supérieure à 2/3 – valeur qui n'a été atteinte que récemment, grâce à de nouveaux types de détecteurs.

C'est avec de tels détecteurs que, en 2013, deux expériences ont fermé cette échappatoire de détection et mis en évidence une violation spectaculaire des inégalités de Bell. D'autres systèmes, notamment des ions, ont également permis de fermer dans une certaine mesure l'échappatoire de détection, mais

TESTER LES INÉGALITÉS DE BELL. Une source émet une paire de photons intriqués γ_1 et γ_2. Leur polarisation est analysée par des polariseurs A et B *(en gris)* alignés respectivement dans les directions *a* et *b*. Chaque polariseur a deux canaux de sortie notés +1 et −1. Un photon γ_1 polarisé parallèlement à l'orientation de l'analyseur A donnera +1, et −1 pour une polarisation perpendiculaire. Il en va de même pour le photon γ_2 avec l'analyseur B. Dans le cas général, la polarisation des photons n'est ni parallèle ni perpendiculaire à l'orientation du détecteur et le formalisme quantique fournit les probabilités de résultats +1 et −1. Pour l'état intriqué utilisé dans les expériences, le formalisme quantique prévoit un résultat aléatoire pour chaque mesure (50 % de probabilité d'avoir +1 ou −1). Mais il prévoit aussi une forte corrélation entre ces résultats aléatoires. Par exemple, si les deux polariseurs sont orientés dans la même direction ($a = b$), le résultat en A et en B sera soit (+1, +1) soit (-1, -1), mais jamais (+1, -1) ou (-1, +1). La corrélation est totale. Dans un modèle réaliste local, on explique ces corrélations par des propriétés communes aux deux photons, de la même façon que les similitudes entre jumeaux sont expliquées par des chromosomes identiques. Les inégalités de Bell montrent que les corrélations prédites par de tels modèles ne peuvent excéder certaines valeurs. Or les prédictions de la mécanique quantique peuvent violer ces inégalités. Un test de Bell consiste à choisir une situation où on prédit un tel conflit, à mesurer les corrélations et à comparer le résultat avec les inégalités de Bell. Pour réaliser un test de Bell « idéal », l'orientation du polariseur doit changer aléatoirement pendant le trajet des photons entre la source et les polariseurs. En outre, l'efficacité des détecteurs doit être supérieure à 2/3.



aucune de ces expériences n'avait pu simultanément fermer celle de localité.

Les physiciens en étaient là en 2015 : les échappatoires de localité et de détection pouvaient être fermées, mais séparément. Et puis, trois équipes indépendantes ont annoncé avoir fermé simultanément les deux échappatoires : celles de Ronald Hanson, de l'université de Delft, aux Pays-Bas, d'Anton Zeilinger, à l'université de Vienne, en Autriche, et de Lynden Shalm, du NIST (le National Institute of Standards and Technology, soit l'Institut américain des normes et de la technologie), à Boulder, dans le Colorado, aux États-Unis.

Les expériences des équipes de Vienne et du NIST sont fondées sur le schéma de la figure page ci-contre. Elles emploient des analyseurs rapidement réorientables, et suffisamment éloignés de la source (respectivement 30 et plus de 100 mètres) pour fermer l'échappatoire de localité. L'orientation des analyseurs est déterminée par un nouveau type de générateur de nombres aléatoires développé par une équipe espagnole. Par ailleurs, toutes les deux utilisent des détecteurs très sensibles, indispensables pour fermer l'échappatoire de détection. Les deux groupes ont atteint une probabilité sans précédent que les deux photons partenaires entrent en même temps dans leur détecteur. Toutes ces innovations ont conduit à une efficacité de 75 %, indiscutablement supérieure aux 2/3 requis, tout en évitant l'échappatoire de localité. L'équipe de Vienne trouve une violation des inégalités de Bell par 11 écarts-types, contre 7 pour le groupe du NIST. Dans les deux cas, il s'agit de résultats totalement convaincants.

Le groupe de Delft a opté pour un principe expérimental différent en préférant intriquer deux centres NV (une sorte d'atome artificiel niché dans un diamant), chacun situé dans un laboratoire distinct. Dans chaque centre NV, le spin d'un électron est associé à un photon émis vers un détecteur situé entre les deux laboratoires. Lorsqu'on détecte simultanément ces deux photons derrière une lame semi-réfléchissante, on obtient un état intriqué des deux spins des électrons des centres NV, séparés par plus de un kilomètre. Dans ce cas et seulement dans ce cas, on garde les mesures de spin des électrons, mesurés en permanence suivant une direction choisie au hasard au dernier moment. On peut ensuite comparer les résultats pour obtenir le niveau de corrélation. Dans ce schéma, lui aussi proposé par Bell, l'échappatoire de détection est automatiquement fermée, car les mesures de spin sont parfaitement efficaces. Par ailleurs, la grande distance (1,3 kilomètre) entre les deux laboratoires permet de choisir la direction de mesure des spins des centres NV indépendamment de l'événement d'intrication, ce qui ferme l'échappatoire de localité. Mais le nombre d'événements observés est très faible : l'équipe de Delft en a répertorié 245, ce qui leur a permis d'obtenir une violation des inégalités de Bell par 2 écarts-types.

Les schémas expérimentaux développés à Vienne, Boulder et Delft vont trouver des applications remarquables dans le domaine de l'information quantique. Par exemple, un test des inégalités de Bell sans échappatoire garantirait de façon inconditionnelle la sécurité de protocoles de cryptographie quantique. Plus encore, ces expériences, en particulier celle de Delft, montrent que l'on peut intriquer des bits quantiques statiques, ce qui offre des pistes nouvelles pour la conception de réseaux quantiques étendus.

Mais souvenons-nous que ces expériences ont d'abord été conçues pour clore le débat entre Einstein et Bohr sur la possibilité de compléter la mécanique quantique. Est-il vraiment clos ? Les expériences que nous avons décrites sont incontestablement les tests expérimentaux des inégalités de Bell les plus proches d'une expérience idéale jamais réalisés. Cependant, aucune expérience réelle, aussi idéale soit-elle, ne peut être vraiment sans échappatoire. Par exemple, dans celles mettant en jeu des photons intriqués, on pourrait imaginer que des propriétés des photons sont déterminées dans le cristal longtemps avant leur émission. On pourrait alors imaginer que les générateurs de nombres aléatoires sont en fait influencés par les propriétés des photons, sans violer la causalité relativiste. Aussi « tirées par les cheveux » qu'elles soient, ces échappatoires résiduelles ne peuvent être ignorées, et d'ores et déjà certains groupes développent des schémas pour les fermer.

Plus loin encore des raisonnements habituels des physiciens, on discute aussi beaucoup de « l'échappatoire du libre arbitre ». Elle est fondée sur l'idée que les choix des orientations que nous considérons comme indépendants (à cause du principe de causalité relativiste) pourraient en fait être corrélés par un événement dans leur passé commun. Puisque tous les événements ont un passé commun si l'on remonte assez loin dans le temps (pourquoi pas jusqu'au Big Bang !), toute corrélation peut être justifiée en invoquant une telle explication. Poussé à l'extrême, cet argument implique que les humains n'ont pas de libre arbitre, et que deux expérimentateurs, même éloignés, ne peuvent pas prétendre être indépendants quand ils règlent les appareils de mesure.

Accusé de sombrer dans la métaphysique en faisant l'hypothèse que les expérimentateurs ont la liberté de choisir les réglages de leurs appareils, Bell répondit à ses contradicteurs : « Quelle honte en effet que d'être pris en flagrant délit de métaphysique ! Mais il me semble plutôt qu'en ce domaine je ne fais que mon métier de physicien théoricien. » Je voudrais modestement me joindre à Bell et dire, en rejetant de telles explications *ad hoc* qui pourraient être invoquées pour expliquer n'importe quel résultat d'expérience : « Je ne fais que mon métier de physicien expérimentateur. »

• **Pour une bibliographie complète, consulter l'article : A. ASPECT, Closing the door on Einstein and Bohr's quantum debate, *Physics*, vol. 8, p. 123, 2015. http://bit.ly/PLS-Aspect**

livres

• **A. DOUGLAS STONE, *Einstein and the Quantum*, Princeton University Press, 2013.**

• **T. DAMOUR, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi, 2005.**

• **A. ASPECT, Une nouvelle révolution quantique, *in* É. BRÉZIN et S. BALIBAR (dir.), *Demain la physique*, Odile Jacob, 2005.**

articles

• **B. HENSEN *et al.*, Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.**

• **M. GIUSTINA *et al.*, Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, 250401, 2015.**

• **L. K. SHALM et al., Strong Loophole-Free Test of Local Realism, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, 250402, 2015.**

• **A. ASPECT et al., Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, 1804-1807, 1982.**

S'affranchir des limites du **quantique**

À ses débuts, la théorie quantique a semblé imposer des contraintes à la science et aux techniques. L'exemple du calcul quantique montre qu'au contraire, de nouveaux horizons s'ouvrent.

David DEUTSCH **est professeur de physique à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne.**

Artur EKERT, **professeur à l'institut de mathématiques d'Oxford, dirige le Centre des technologies quantiques de Singapour.**

En 1888, Camille Flammarion illustre le chapitre *La forme du ciel* de son ouvrage *L'atmosphère : météorologie populaire* par une gravure sur bois au destin peu ordinaire. Agenouillé dans un paysage terrestre, un pèlerin ou un clerc passe la tête à travers le firmament, là où ciel et terre se rencontrent, et contemple, médusé, l'inconnu. Un temps datée du Moyen Âge, la « gravure sur bois de Flammarion », ainsi nommée car c'est chez cet auteur qu'on la trouve pour la première fois, a plus probablement été confectionnée à la Renaissance, puis recadrée. Mais oublions ces détails et intéressons-nous plutôt aux deux interprétations diamétralement opposées qu'elle nous propose à propos de ce qu'est la connaissance. *(voir la figure page 28)*.

Selon la première, elle n'est limitée que par une barrière imaginaire que l'activité scientifique finit toujours par franchir ; selon la seconde, la connaissance est limitée par une barrière véritable que l'on ne peut franchir que par l'imagination. Selon cette dernière vision, nous serions donc enfermés à l'intérieur de la bulle finie de ce qui nous est familier. Nous ne pouvons donc espérer comprendre que le monde de notre expérience directe, tandis que ce qui se trouve à l'extérieur de la barrière reste inaccessible à la compréhension et à l'explication.

L'activité scientifique ne fait-elle que nous dévoiler l'impossibilité de dépasser notre horizon habituel, ou transcende-t-elle la bulle du familier pour révéler des horizons nouveaux ? Nous verrons qu'elle nous a amenés à franchir la barrière infranchissable que semblait constituer l'horizon quantique derrière lequel se trouve le monde microscopique.

Pour beaucoup, la théorie quantique montrerait clairement que c'est la seconde vision – la vision pessimiste de la connaissance – qui s'impose. Les théoriciens ont très tôt enseigné à son propos une irrationalité délibérée : « Si vous pensez que vous comprenez la théorie quantique, c'est que vous ne la comprenez pas. » « Vous n'avez pas le droit de poser cette question. » « La théorie est insondable, et donc le monde aussi. » « Les choses sont comme cela, sans raison ni explication. » Voilà le genre de phrases qu'on lisait dans les manuels de physique quantique et les textes de vulgarisation…

Au-delà du mur

Pour autant, les avancées des dernières décennies contredisent ces allégations. Depuis que la théorie quantique existe, les physiciens ont souvent pensé que des obstacles en découlent, qui empêchent d'exploiter la nature quantique aussi facilement que la physique classique (non quantique) nous a habitués à le faire. Toutefois, aucun de ces obstacles ne s'est jamais concrétisé. Au contraire, la théorie quantique s'est révélée libératrice. Loin d'être limitantes, les propriétés fondamentalement quantiques telles que la superposition des états, leur intrication, la quantification et l'aléatoire se sont montrées d'une grande fécondité. Grâce à elles, toutes sortes de dispositifs aux effets presque miraculeux, tels les lasers, les circuits intégrés, les horloges atomiques, etc., ont été mis au point.

Et ce n'est que le début. Nous allons exploiter de plus en plus les phénomènes quantiques au sein de systèmes de communications et de calcul d'une puissance jusque-là inconcevable. Nous sommes en train de découvrir de nouvelles façons d'exploiter la nature et de produire du savoir.

En 1975, Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, prédisait que le nombre de transistors par microprocesseur doublerait tous les deux ans



environ. Cette « loi de Moore » reste globalement vérifiée aujourd'hui… Pour autant, il était déjà clair au moment de son énoncé qu'elle trouverait une limite physique, on parle de « mur » lorsqu'on s'approcherait de l'échelle atomique, là où on serait confronté aux effets quantiques. Et après ? Après, les ingénieurs entreraient dans le domaine de l'inconnu.

La fin du progrès

De même, dans la vision usuelle de la théorie quantique, le principe d'incertitude de Heisenberg est censé représenter un horizon de l'inconnaissable, même avec toute la technique du monde. Il édicte en effet que plus notre connaissance d'une certaine propriété d'un système est précise, plus notre connaissance de certaines autres propriétés du même système sera imprécise. La détermination précise de la position d'une particule, par exemple, implique que celle de sa vitesse devient imprécise. Ce qui ne peut être connu ne pouvant être maîtrisé, les tentatives de manipulation d'objets microscopiques semblent donc se heurter à un aléa sous-jacent, à des corrélations inexplicables en physique classique et à d'autres remises en question de la hiérarchie temporelle entre causes et effets. Dès lors, une conclusion incontournable semble s'imposer : la fin du progrès des techniques de l'information ne saurait qu'être proche.

Aujourd'hui pourtant, des physiciens contrôlent de façon routinière divers phénomènes quantiques et ils ne se heurtent pas à de telles barrières. Ils codent de l'information à l'aide d'atomes ou de particules élémentaires, puis, en dépit du principe d'incertitude, la traitent avec une extrême précision. Ils créent ainsi des fonctionnalités qui ne pourraient être réalisées autrement. De quoi s'agit-il ?

Examinons d'abord le bit classique, c'est-à-dire la brique de base de l'information telle qu'on la conçoit classiquement. Pour un physicien, un bit est un système physique qui peut être placé dans l'un de deux états, représentant deux valeurs logiques, *oui* ou *non*, *vrai* ou *faux*, et que l'on note 1 ou 0. Dans les ordinateurs dits classiques, un bit peut correspondre à la présence ou à l'absence d'une charge dans un condensateur. Un bit quantique peut par exemple être obtenu à partir d'un atome, en utilisant deux états d'énergie d'un électron atomique : l'état fondamental de plus basse énergie et un état d'énergie supérieure peuvent jouer les rôles respectifs du 0 et du 1.

Pour manipuler cette information, les physiciens envoient sur l'atome des impulsions lumineuses π, c'est-à-dire des impulsions ayant la fréquence, la durée et l'amplitude adéquates pour faire passer l'atome de 0 à l'état 1 et *vice-versa*. Les physiciens peuvent aussi ajuster la fréquence pour manipuler deux atomes qui interagissent, afin qu'un atome contrôle ce qui arrive à l'autre. Nous avons ainsi tous les ingrédients nécessaires à la construction des composants élémentaires des ordinateurs classiques que sont les portes logiques à un et à deux bits, et cela sans que le principe d'incertitude ne soit une entrave.

Précisons ce que le principe d'incertitude dit exactement et ce qu'il ne dit pas. Parmi les propriétés mesurables d'un atome ou d'un autre système physique, que l'on appelle « observables », certaines peuvent être déterminées, à un instant donné, de façon précise. Le principe d'incertitude n'exclut donc pas qu'une observable puisse être mesurée avec précision. Il affirme juste que toutes les observables d'un système physique ne sauraient être mesurées avec précision en même temps.

Dans le cas de l'électron d'un atome, l'observable mesurée précisément est son énergie et, de fait, dans l'état 0 comme dans l'état 1, la particule électrique a une énergie parfaitement définie. Cela implique que d'autres observables, telles la position et la vitesse, ne peuvent être déterminées avec précision. On dit que l'électron est délocalisé (il n'a pas de position bien définie) et, de même, sa vitesse prend simultanément toute une plage de valeurs. Si nous essayions de stocker de l'information au

L'ESSENTIEL

• Le caractère quantique des phénomènes microscopiques devait limiter la précision des observations possibles.

• Enracinée dans certaines visions philosophiques, cette idée est pourtant erronée.

• Certains traits des phénomènes quantiques peuvent être observés avec une précision absolue.

• On peut alors créer des bits et exécuter des calculs binaires.

• Les phénomènes quantiques peuvent aussi être exploités pour de nouveaux types de calcul, voire de raisonnement.

LA GRAVURE SUR BOIS de Flammarion (ici dans une version colorisée) soulève la question des limites à la connaissance et de la possibilité de les franchir.



moyen de la position et de la vitesse de particules, nous nous heurterions effectivement à une limite quantique. La solution consiste donc à choisir judicieusement les observables qui vont servir de bits quantiques pour le codage de l'information.

Si notre seul but est de construire des ordinateurs classiques en employant des atomes plutôt que des transistors, alors tout ce dont nous avons besoin, ce sont des observables que l'on peut mesurer précisément. Toutefois, la physique quantique offre bien plus, puisqu'elle nous donne aussi la possibilité d'exploiter des observables qui, dans certaines situations, ne peuvent être mesurées que de façon imprécise: les observables « floues ». Le fait que les observables puissent prendre simultanément de multiples valeurs augmente beaucoup leur intérêt pratique.

L'énergie, par exemple, est souvent d'une valeur précise, mais un système physique peut être dans plusieurs états d'énergie à la fois. Par exemple, en plus d'être dans l'état fondamental 0 ou dans l'état excité 1, un électron atomique peut aussi être dans une superposition des deux états 0 et 1.

Une racine carrée de NON

Tout système physique est susceptible de se trouver dans un état superposé. Quand on sait préparer un tel état, le mesurer et le manipuler de façon fiable, il peut servir de bit quantique. Dans le cas d'un bit quantique atomique, l'usage d'impulsions lumineuses adéquates permettra de commuter l'énergie d'un électron d'une valeur précise à une autre, ou encore d'une valeur précise à une valeur indéterminée (état superposé), et *vice-versa*. Ainsi, une impulsion π échange les états 0 et 1, tandis qu'une impulsion $\pi/2$ (de même fréquence mais de durée ou d'amplitude moitié) place l'électron dans une superposition des états 0 et 1.

Si nous mesurions l'énergie de l'électron dans une telle superposition, nous trouverions avec une probabilité de 50 % soit l'énergie de l'état 0, soit celle de l'état excité 1. Serions-nous donc limités par l'aléa quantique ? Non, car on peut facilement contourner cet obstacle apparent et, ce faisant, créer une fonction nouvelle. Au lieu de mesurer l'électron, laissons-le dans cet état de superposition. Considérons par exemple un électron dans l'état 0, et appliquons-lui une première impulsion $\pi/2$, puis une seconde. Quand nous mesurons alors l'état de cet électron, on trouve qu'il est dans l'état 1, et cela dans 100 % des mesures *(voir l'encadré page 30)*. Au lieu d'être « floue », l'observable a été rendue précise.

Pour comprendre l'importance d'une telle manipulation, envisageons la porte logique la plus élémentaire d'un ordinateur, la porte NON. Avec cet élément de base des circuits logiques, le signal d'entrée, 0 ou 1, est transformé en son contraire (1 ou 0). Supposons maintenant que l'on se pose le problème suivant: construire la « racine carrée » de NON, c'est-à-dire une porte logique qui, agissant deux fois de suite sur une entrée, produit sa négation. À partir des portes logiques classiques, ce problème est sans solution, alors qu'une impulsion $\pi/2$ résout le problème pour un bit quantique atomique, puisque la succession de deux impulsions $\pi/2$ inverse 0 en 1, ou 1 en 0. Des expérimentateurs ont obtenu des portes « racines carrées » et d'autres portes logiques impossibles en contexte classique à l'aide de bits quantiques constitués de photons, d'ions piégés, d'atomes ou encore de spins. Tous ces composants nouveaux constituent les éléments de base d'un ordinateur quantique.

Lancé dans une tâche, un ordinateur, classique ou quantique, accomplit une séquence précise d'instructions – un algorithme. Or, on quantifie l'efficacité d'un algorithme en évaluant l'augmentation de son temps d'exécution quand l'importance (en quantité, en taille…) des entrées augmente. Le temps nécessaire à la multiplication de deux nombres à N chiffres par l'algorithme habituel (celui que nous avons appris à l'école) augmente par exemple comme N^2. En revanche, le temps de calcul nécessaire pour accomplir, par la méthode la plus rapide que nous connaissions, l'opération inverse, c'est-à-dire la factorisation d'un nombre en ses facteurs premiers, augmente plus vite que toute puissance de N. L'algorithme de factorisation est donc considéré comme inefficace.

Toutefois, en permettant de construire des portes logiques inédites, la mécanique quantique rend de nouveaux algorithmes possibles. L'un des exemples les plus frappants est la factorisation d'un nombre. En 1994, Peter Shor, des laboratoires Bell, a mis au point un algorithme quantique accomplissant la factorisation de nombres à N chiffres en une série d'étapes augmentant non pas exponentiellement, mais comme N^2. Dans le cas d'autres types de problèmes, telle la recherche au sein d'une longue liste, les ordinateurs quantiques offrent des avantages moins marquants, mais ils seront tout de même notablement plus avantageux que les ordinateurs classiques. Certes, tous les algorithmes quantiques ne sont pas aussi efficaces que celui de Shor, et

livre

• **D. DEUTSCH, *The Beginning of Infinity: Explanations That Transform the World*, Penguin, 2012.**

articles

• **D. DEUTSCH, The logic of experimental tests, particularly of Everettian quantum theory, 2016. arxiv.org/abs/1508.02048**

• **D. DEUTSCH et C. MARLETTO, Constructor theory of information, *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 471, 20140540, 2015.**

• **A. EKERT et R. RENNER, The ultimate physical limits of privacy, *Nature*, vol. 507, pp. 443-447, 2014.**

nombre d'entre eux ne sont pas plus rapides que leurs équivalents classiques.

Pour toutes ces raisons, les premières applications pratiques des ordinateurs quantiques ne seront sans doute pas la factorisation, mais la simulation d'autres systèmes quantiques, tâche dont la durée dans les ordinateurs classiques augmente exponentiellement avec la taille des données. De telles simulations pourraient avoir un énorme impact en pharmacie ou dans le développement de nouveaux matériaux.

Pour autant, les ordinateurs quantiques n'existent pas encore. Ceux qui ne croient pas à la possibilité d'en réaliser mettent en avant le problème de l'enchaînement d'opérations logiques successives. En effet, outre les difficultés techniques liées à la manipulation d'atomes ou de photons uniques, il faut empêcher – et c'est le principal problème – que le calcul quantique ne soit perturbé par les interactions du système quantique, qui stocke et traite l'information, avec son environnement. Ce processus, la décohérence, est souvent présenté comme une limite fondamentale au calcul quantique.

Ce n'est pas le cas. La théorie quantique fournit des moyens de corriger les erreurs dues à la décohérence. En effet, si les sources d'erreur satisfont certaines conditions – par exemple si les erreurs aléatoires se produisent indépendamment sur chacun des bits quantiques et si les portes logiques fonctionnent de façon assez précise –, alors il est possible de faire fonctionner les calculateurs quantiques de façon stable et aussi longtemps que l'on voudra.

Repousser les limites

Le cas des nouvelles fonctions logiques illustre le fait que les progrès de la connaissance du monde physique entraînent aussi des progrès en logique et en calcul. Bien que les vérités mathématiques soient indépendantes de la physique, nous en acquérons souvent la connaissance en exploitant des phénomènes physiques. Une démonstration mathématique est une suite d'opérations logiques. Donc, ce qui est démontrable ou non dépend des fonctions logiques (telle la fonction NON) que les lois physiques permettent de réaliser.

Ces fonctions doivent être assez simples sur le plan physique pour que nous ne puissions douter de leur fonctionnement, et notre confiance sur ce point est enracinée dans notre connaissance du monde physique. Puisqu'elle ajoute au répertoire des opérateurs logiques disponibles de nouvelles fonctions, telles que la racine carrée de NON, la physique quantique permettra aux mathématiciens de franchir des barrières que l'on supposait exister dans le monde des abstractions pures. En d'autres termes, la physique quantique permettrait aux mathématiques de repousser leurs limites.

Puisque de nouveaux types de calculs sont possibles grâce aux phénomènes quantiques,

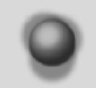
DÉPASSER LES LIMITES DU CALCUL QUANTIQUE

Le monde microscopique est régi par des lois quantiques qui constitueraient des obstacles insurmontables pour la miniaturisation en électronique. Toutefois, les physiciens ont appris à les contourner. Exemple avec deux « barrières » supposées infranchissables.

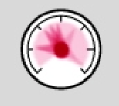
PRINCIPE D'INCERTITUDE de HEISENBERG

PROBLÈME : Ce principe quantique fondamental limite la précision de certaines mesures. Ainsi, si l'on détermine exactement la position d'une particule, elle aura tout un éventail de vitesses simultanées. Si, au contraire, c'est sa vitesse que l'on mesure exactement, sa position s'étalera de manière inéluctable. C'est pourquoi l'utilisation de la position et de la vitesse est inappropriée au stockage et au traitement de l'information.

Position déterminée avec précision



Vitesse floue, imprécisément définie



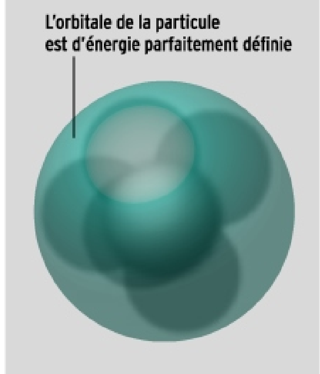
Position floue, imprécise



Vitesse déterminée avec précision

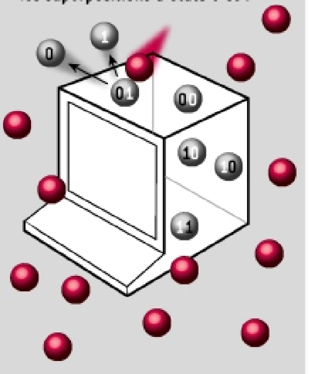


SOLUTION : Dans des situations où la vitesse et la position ne peuvent qu'être incertaines, d'autres grandeurs observables peuvent au contraire être bien définies. C'est souvent le cas de l'énergie, mais dans les situations où l'énergie est incertaine, d'autres grandeurs observables conviennent.

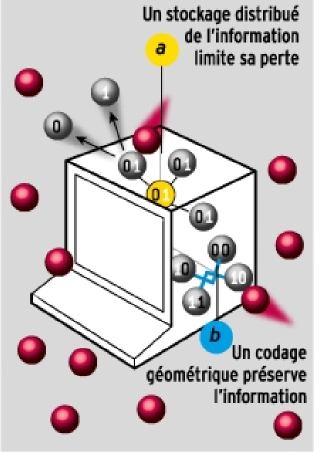


LA DÉCOHÉRENCE DES ÉTATS DE SUPERPOSITION

PROBLÈME : Les particules dont est formé un ordinateur interagissent avec leur environnement, ce qui fait perdre l'information stockée et fausse les calculs quantiques.



SOLUTION : Des techniques de correction d'erreur peuvent compenser les effets de la décohérence assez longtemps pour que le calcul quantique s'achève. On peut par exemple répartir l'information quantique sur de multiples particules *(a)* ou la coder sous une forme géométrique, qui sera résistante par nature aux perturbations *(b)*.



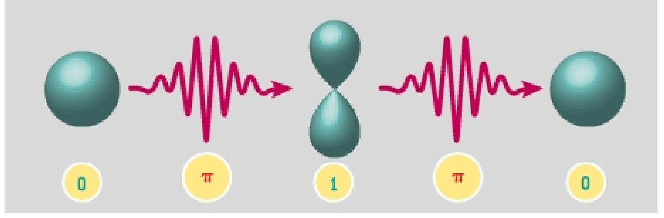
©Jen Christiansen

IMPOSSIBLE ? MAIS NON !

Les ordinateurs quantiques seront non seulement capables de faire tout ce que font aujourd'hui les ordinateurs classiques, mais ils pourront aussi accomplir de nouvelles fonctions logiques. Dans l'exemple ci-dessous, deux états électroniques d'un atome représentent les deux valeurs possibles d'un bit. Dans un état ou l'autre d'un tel bit atomique, l'électron n'a ni position ni vitesse définies : il s'étale sur des régions sphériques ou ovales nommées orbitales *(en vert)*, et sa vitesse a toute une plage de valeurs différentes simultanées. Néanmoins, les deux états ont une énergie bien définie, qui détermine la valeur du bit.

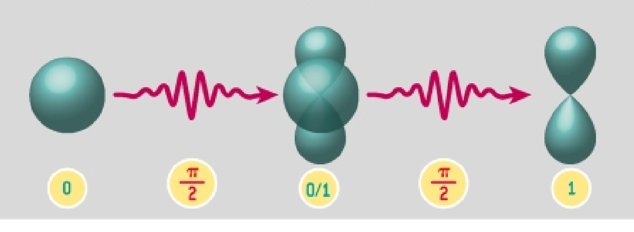
LA FONCTION LOGIQUE NON ORDINAIRE

Pour effectuer l'opération logique la plus élémentaire, celle de la négation NON qui consiste à inverser la valeur d'un bit, on procède en envoyant des impulsions lumineuses de fréquence, durée et intensité adéquates (on les nomme des impulsions π). Si l'électron est initialement dans l'état 0, il se retrouve alors dans l'état 1, et vice versa.



LA RACINE CARRÉE DE NON

Cette procédure peut être modifiée afin de créer une opération qui n'existe pas en électronique conventionnelle : la « racine carrée de NON ». Pour ce faire, une impulsion dite $\pi/2$, d'amplitude plus faible et de durée plus courte que l'impulsion π, transforme l'état électronique 0 ou 1 en une superposition de ces deux états ; une seconde impulsion $\pi/2$ fait alors passer l'électron soit dans l'état 1 (s'il était au départ dans l'état 0), soit dans l'état 0 (s'il était au départ dans l'état 1). De telles nouvelles fonctions logiques confèrent aux ordinateurs quantiques une puissance énorme.



pourquoi les physiciens ont-ils craint que la théorie quantique limite le progrès scientifique ? La réponse remonte à l'époque où cette théorie est née sous le nom de mécanique quantique. Erwin Schrödinger (1887-1961), l'un de ses pères fondateurs, prévint un jour son auditoire qu'il allait dire quelque chose qui pouvait être considéré comme insensé : il déclara alors que son équation décrit toutes les évolutions possibles d'une particule, lesquelles ne sont « pas des alternatives, mais se produisent vraiment toutes simultanément ». Il ne faisait en fait qu'affirmer que son équation décrit la réalité ! Pour autant, Schrödinger éprouvait par avance le besoin de se défendre du risque qu'on le prenne pour un fou.

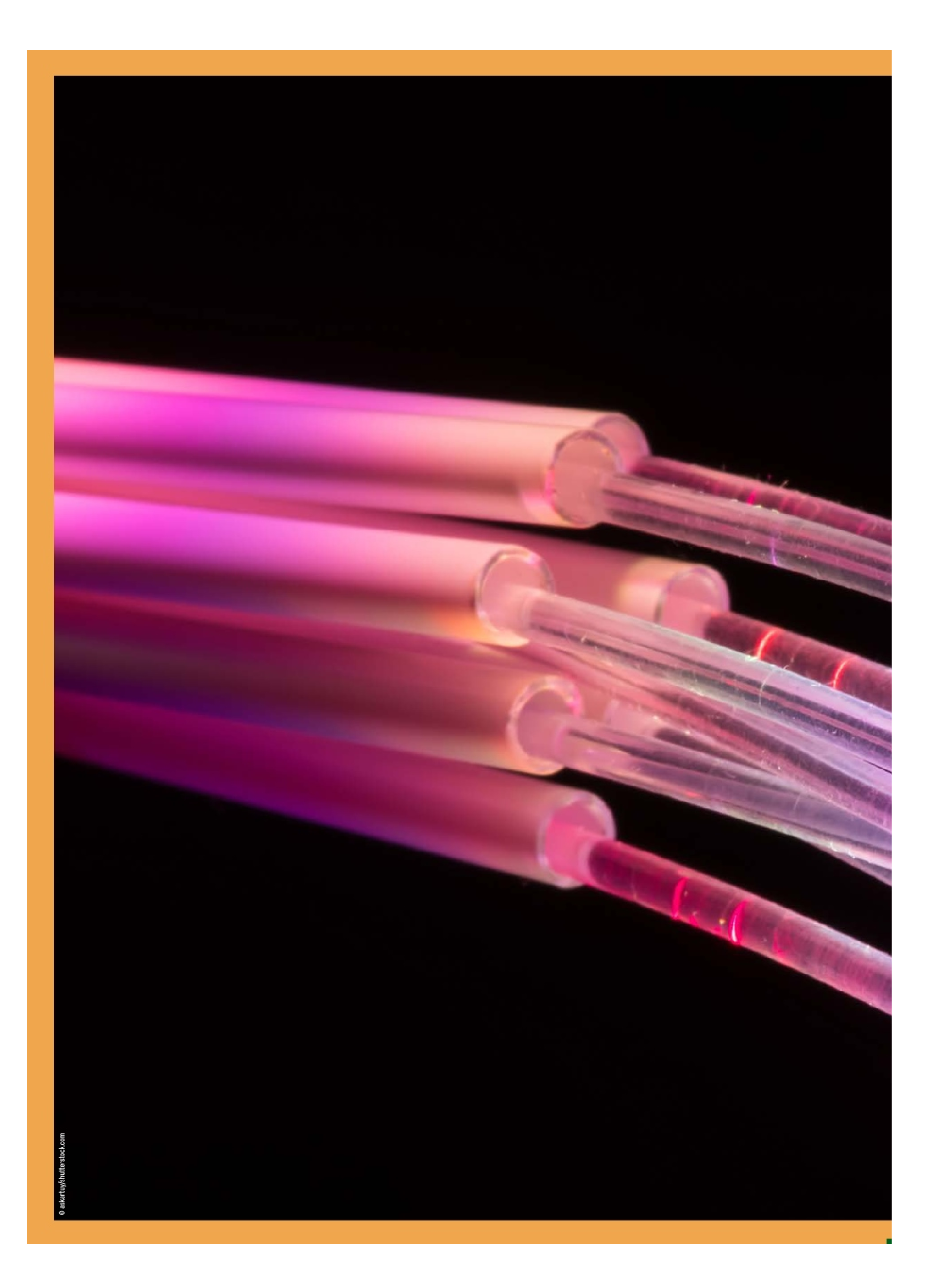
Pourquoi en était-il ainsi ? Parce qu'au début du XXe siècle, la plupart des physiciens étaient sous l'influence de doctrines philosophiques entravant l'acquisition de nouveaux savoirs. La physique fondamentale est si intimement liée à la philosophie qu'au début du XXe siècle cette dernière a pu avoir des effets nocifs sur des domaines entiers de la physique. Ces doctrines problématiques sont l'empirisme logique (« Si ce n'est pas vérifiable par l'expérience, cela n'a pas de sens »), l'instrumentalisme (« L'essentiel est que les prédictions marchent, inutile de se préoccuper de ce qui les amène »), le relativisme philosophique (« Les affirmations ne sont pas objectivement vraies ou fausses, elles ne sont que légitimes ou illégitimes dans une culture particulière »).

Tous ces courants ont en commun de s'opposer au réalisme philosophique, c'est-à-dire à l'idée que le monde physique existe et que la méthode scientifique permet d'accumuler des connaissances sur lui. C'est dans cette atmosphère que le physicien Niels Bohr a développé son influente interprétation de la théorie quantique, qui nie la possibilité de parler de phénomènes comme s'ils existaient objectivement. On n'y est pas autorisé à se demander quelles valeurs prennent les grandeurs physiques tant qu'on ne les mesure pas. Les physiciens, qui, par vocation, ne peuvent s'empêcher de se poser de telles questions, ont essayé de ne plus le faire, et la plupart d'entre eux ont formé leurs étudiants à ne pas le faire. La théorie à la pointe du domaine scientifique le plus fondamental semblait contredire l'existence même d'une réalité physique connaissable objectivement.

Certains philosophes, tels Bertrand Russell et Karl Popper, n'ont pas abandonné le réalisme. Tous les physiciens non plus : Einstein et David Bohm se sont opposés au courant dominant, puis Hugh Everett a proposé que les quantités physiques prennent réellement plus d'une valeur à la fois (ce qui est notre vision des choses). Toutefois, dans l'ensemble, les philosophes ne se sont pas intéressés vraiment à la réalité, et même si les physiciens ont continué à se servir de la théorie quantique dans un grand nombre de leurs domaines, la recherche sur la nature exacte des phénomènes physiques s'est égarée.

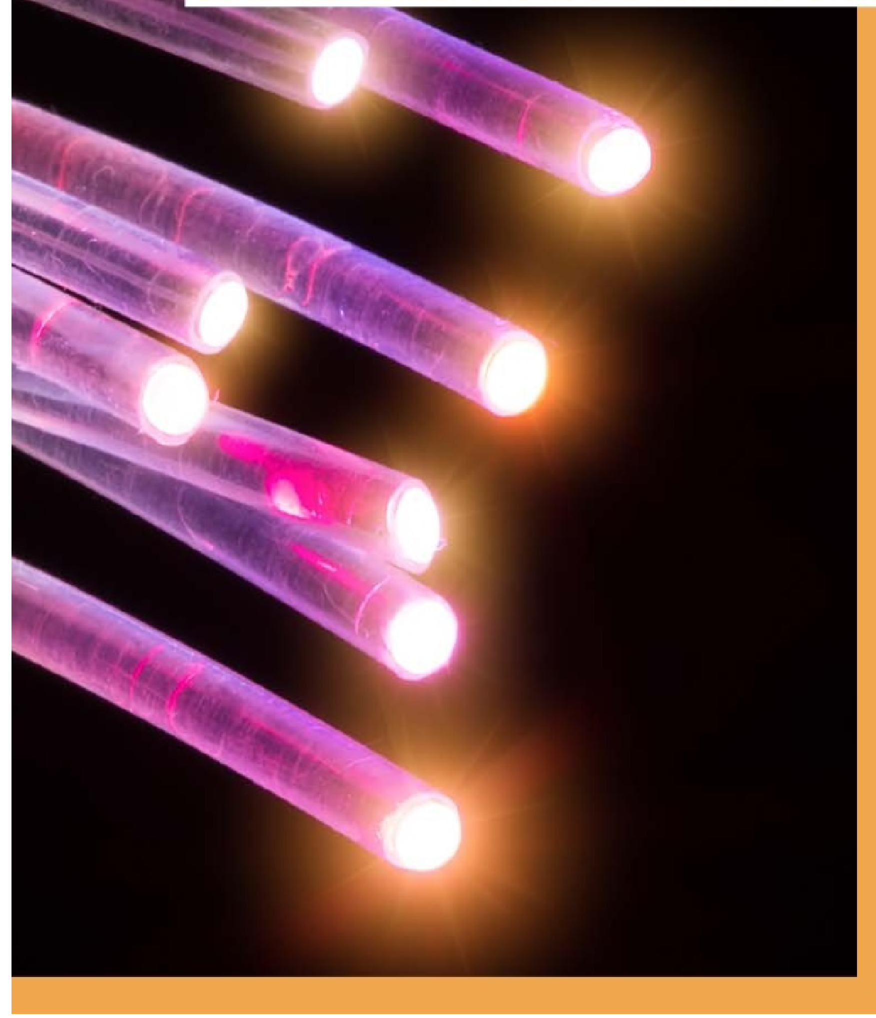
La situation s'améliore, et l'on peut dire que c'est la physique qui a remis la philosophie sur les rails. Les gens veulent de toute façon comprendre la réalité, et nous dépassons enfin les limites assignées par des points de vue philosophiques néfastes.

Et si la théorie quantique finissait par être réfutée, de sorte que des barrières plus fondamentales empêchent la construction d'ordinateurs quantiques ? Ce serait stimulant, car cela nous permettrait non seulement de faire évoluer la physique fondamentale, mais aussi sans doute d'envisager des techniques de calcul encore plus fascinantes. La théorie de « ce qui met la théorie quantique en défaut » ne peut qu'être prometteuse, de sorte que, d'une façon ou d'une autre, il n'y aura pas de limite au savoir et au progrès. ■



LE QUANTIQUE AU QUOTIDIEN

De façon plus ou moins inaperçue, la physique quantique irrigue notre monde sous la forme de très nombreuses applications et de phénomènes qu'elle seule peut expliquer. C'est la première révolution quantique. La deuxième est aujourd'hui en cours et porte en elle de nombreuses promesses : ordinateur quantique, cryptographie… Certains annoncent même une troisième révolution quantique !



LES FIBRES OPTIQUES ne pourraient exister sans l'apport de la physique quantique, qui a élucidé les interactions de la lumière avec la matière.

La physique quantique de **proximité**

On imagine que la physique quantique ne concerne que l'infiniment petit. Pourtant, elle est au cœur de nombre d'applications de notre vie quotidienne. Comme Monsieur Jourdain faisait de la prose, nous manipulons des objets quantiques sans le savoir.

LÉVITATION ET DÉSORDRE. Un supraconducteur transporte un courant électrique sans dissipation et peut aussi léviter dans un champ magnétique. La stabilité de cette lévitation est rendue possible par des vortex que crée le champ magnétique quand il pénètre dans le matériau et que l'on piège par un peu de désordre.

Thierry GIAMARCHI
est directeur de recherche CNRS et professeur à l'université de Genève où il dirige le département de physique de la matière quantique.

Dans un sondage sur les découvertes qui ont bouleversé notre vie quotidienne, la physique quantique ne serait probablement pas en tête. En effet, le mot « quantique » et ses dérivés sont peu connus du grand public qui, au mieux, a entendu parler d'ordinateur quantique. Et l'on peut gager que pour la plupart, il évoque… le titre d'un *James Bond*.

Dans tous les cas, la connexion de notre quotidien avec la physique quantique reste mystérieuse. Ceux qui ont une vague idée de ce qu'elle recouvre en ont retiré l'impression qu'une telle théorie n'a d'utilité que dans des laboratoires de recherche pour décrire des systèmes à une échelle inhumainement petite, et à très basse température. Il s'agit donc de quelque chose de certainement intéressant pour des physiciens, mais qui n'a rien à voir avec notre vie de tous les jours. Pourtant rien n'est plus loin de la vérité : la physique quantique a déjà bouleversé notre société.

Une boîte de sucres isolante

Une propriété essentielle de la physique quantique est la dualité onde-corpuscule, introduite par Louis de Broglie, qui stipule que toute matière peut être vue comme une onde. Ainsi, le mouvement et les propriétés de la matière sont aussi ceux des ondes. Par exemple, deux ondes de matière peuvent interférer, c'est-à-dire s'annuler ou bien se renforcer. Tout système est décrit par une fonction d'onde (l'équation de Schrödinger) qui fournit la probabilité de trouver de la matière en un point donné de l'espace.

Cette nouvelle description de la matière a révolutionné notre compréhension des matériaux. En effet les électrons dans un solide ne sont plus seulement des « billes », mais des ondes. Or toutes ces ondes ne peuvent pas se propager dans le solide à cause du potentiel périodique crée par les atomes : certaines énergies sont autorisées pour les électrons, d'autres sont interdites.

Puisqu'il est impossible pour deux électrons dans un solide d'avoir le même état quantique, nous y reviendrons, on doit dénombrer les fonctions d'ondes autorisées pour « remplir » un solide avec ses électrons. Lorsque toutes sont occupées, la situation est celle d'une boîte à sucres pleine à ras bord : rien ne peut bouger ; le matériau est un isolant.

À l'inverse, avec une boîte partiellement pleine, les électrons ont beaucoup d'options pour changer d'état quand, par exemple, on ajoute un champ électrique : le matériau est bon conducteur. La physique quantique nous a donc donné les clefs de ce qui fait un bon métal ou un bon isolant. Elle a aussi éclairé le comportement de matériaux intermédiaires, les semi-conducteurs – ni isolants, ni metalliques –, ouvrant la porte à toute l'électronique moderne et à toute la société de l'information dans laquelle nous vivons.

Ce ne sont pas les seules conséquences de la physique quantique. La compréhension de la nature ondulatoire de la matière a permis la création de matériaux qui convertissent la lumière en un signal électrique. On les trouve dans les caméras CCD. L'inverse existe aussi, ce sont les diodes électroluminescentes (les LED) qui transforment avec une efficacité remarquable un signal électrique en un signal lumineux. Ces deux éléments sont utilisés de façon quotidienne dans les appareils qui nous entourent.

Ainsi, nos téléphones portables et leurs multiples dérivés sont des conséquences directes de ce que la physique quantique nous a apporté. Ils sont l'illustration spectaculaire d'un transfert rapide (une vingtaine d'années) de grandes découvertes fondamentales vers des secteurs très appliqués.

Encore plus quantique

La physique quantique a d'autres ingrédients qui ont des conséquences encore plus subtiles. L'un deux est le principe d'indiscernabilité selon lequel des particules identiques, même si elles n'interagissent pas, connaissent l'état quantique de toutes les particules du même type et contraignent leur comportement en conséquence. Plus mathématiquement, cela signifie que pour des particules identiques la fonction d'onde n'est pas le simple produit des fonctions d'ondes des particules individuelles. Les seules fonctions autorisées sont soit totalement symétriques par permutation des particules, soit totalement antisymétriques par de telles permutations *(voir l'encadré page 38)*.

De cette distinction des fonctions d'onde, on déduit qu'il existe deux types de particules, les bosons et les fermions. La fonction d'onde des premiers doit être totalement symétrique par permutation des particules ; celle des seconds est totalement antisymétrique. Cela signifie en particulier que deux fermions ne peuvent pas être dans le même état quantique.

Pour les bosons, une façon d'avoir une fonction d'onde symétrique par permutation consiste à mettre toutes les particules dans le même état quantique. Un système de bosons accède à cet état spécial quand la température devient très basse. Il se produit alors une transition de phase : les bosons passent d'un état où un grand nombre de bosons sont dans des états quantiques différents à un état où essentiellement tous les bosons sont dans le même état quantique. Cette transition, conséquence directe du principe d'indiscernabilité, est nommée condensation de Bose-Einstein. Cette transition a été observée pour la première fois dans l'hélium 4 en 1938 et dans des gaz d'atomes ultrafroids en 1995. L'une des conséquences importantes d'une telle transition *(voir la figure page suivante)* est que le fluide peut couler sans friction, conduisant au phénomène de suprafluidité.

Qu'en est-il des fermions ? Pour eux, la condensation est *a priori* impossible, car on ne peut pas trouver deux fermions dans le même état quantique, c'est le principe d'exclusion de Pauli. Il explique la nature

L'ESSENTIEL

- **La physique quantique a bouleversé notre société et notre vie quotidienne.**
- **Elle se manifeste dans nombre d'applications qui n'auraient pu voir le jour sans elle.**
- **En expliquant le comportement de la matière, elle a conduit à la première révolution quantique : téléphone portable, ordinateur, IRM…**
- **La seconde nous promet un secret absolu de nos communications et des ordinateurs quantiques surpassant de loin ceux d'aujourd'hui.**
- **La troisième révolution est déjà en marche…**

des solides, mais semble interdire la suprafluidité. Pourtant en 1911, une résistivité nulle était observée avec du mercure refroidi. C'était la naissance de la supraconductivité. Comprendre un tel phénomène était un défi intellectuel. Des pas importants ont été faits au niveau expérimental avec la découverte en 1933 de l'effet Meissner : un supraconducteur est « allergique » aux champs magnétiques et tend à les expulser *(voir la figure page 34)*.

Sur le plan théorique, une contribution cruciale a été apportée en 1935 quand on comprit que l'effet Meissner était possible, car un courant était créé à la surface du supraconducteur et circulait sans perte justement grâce à la nature supraconductrice du système. Le supraconducteur devenait similaire à un électroaimant repoussant le champ magnétique. La découverte de la suprafluidité en 1938 semblait indiquer que les deux phénomènes étaient peut-être similaires. Cependant, si la suprafluidité était relativement simple à expliquer compte tenu de la nature bosonique du système, faire le contact avec des systèmes fermioniques semblait impossible.

Ce n'est qu'en 1957 que l'explication – la théorie BCS –, fut découverte. Un des ingrédients essentiels de cette théorie est de montrer que du fait des vibrations du réseau des atomes dans un solide, il existe une faible attraction entre les électrons dans un solide. Cette attraction devrait être trop faible pour avoir le moindre effet, mais grâce au principe de Pauli, et le fait que certains états quantiques sont interdits, elle conduit à la formation de paires d'électrons (des paires de Cooper). Le mystère était résolu ! Une paire de fermions se comporte essentiellement comme un boson et ces paires peuvent donc avoir une condensation de Bose-Einstein, ce qui permet de connecter les deux phénomènes.

Cette théorie a ouvert la porte à des développements étonnants et mis en évidence des propriétés inattendues des supraconducteurs. En particulier les études théoriques ont montré que le comportement des supraconducteurs dans un champ magnétique est plus complexe que prévu. En fait, au-delà d'un seuil critique, le champ magnétique n'est pas totalement expulsé des supraconducteurs, mais peut pénétrer sous la forme de tubes de flux magnétiques. Chacun de ces tubes laisse passer un flux magnétique quantifié, et correspond à un tourbillon de courant qui atténue le champ magnétique pour le reste du système. Ces tourbillons (des vortex) sont l'équivalent pour un suprafluide des tourbillons quantifiés qui apparaissent quand on met le suprafluide en rotation.

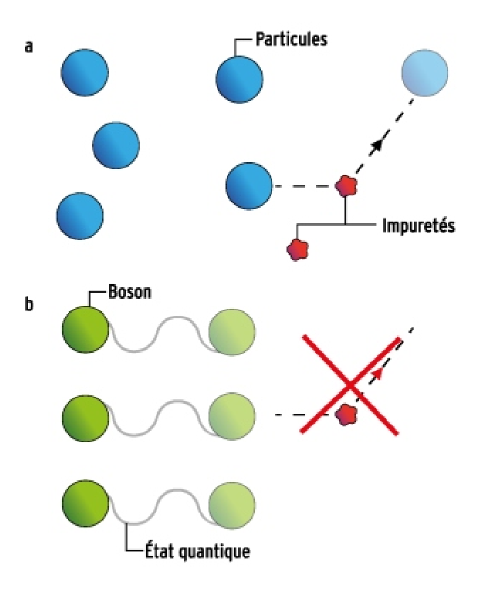
Ce réseau de vortex a des conséquences dramatiques pour les propriétés des supraconducteurs. Par exemple, si l'on fait passer un courant électrique, les vortex sont mis en mouvement par la force de Lorentz qui s'exerce sur un tube de champ magnétique. Mais un champ magnétique en mouvement génère un champ électrique. En fin de compte, le système redevient un conducteur normal. Toute la beauté de l'état supraconducteur et la plupart des applications possibles disparaissent.

Pour résoudre ce problème, on doit empêcher les vortex de bouger. Pour ce faire, on insère des impuretés dans le système qui piègent ces tubes de flux. Ainsi, pour faire de bons supraconducteurs, il faut, ce qui est contre-intuitif, désordonner les matériaux. Cette découverte a conduit à des recherches fondamentales sur les effets du désordre dans de tels systèmes quantiques, mais a aussi ouvert la porte aux applications des supraconducteurs.

La supraconductivité au quotidien

Les propriétés des supraconducteurs, conséquence directe de la physique quantique, ne sont pas restées des curiosités de laboratoire. La mise en œuvre est cependant un peu plus complexe que dans le cas des composants électroniques, car les supraconducteurs connus ont besoin d'être refroidis. Ce n'est pas un obstacle majeur, et une part importante de la recherche est de trouver de « meilleurs » supraconducteurs de ce point de vue, nous y reviendrons. Les applications se répartissent en deux catégories principales : des applications de puissance, liées à la capacité de transporter du courant sans pertes ; des applications plus subtiles qui n'ont pu être conçues qu'après avoir compris la nature quantique du phénomène de supraconductivité.

La première application des supraconducteurs est un câble transportant un courant important sans dissipation. On peut ainsi fabriquer des aimants de puissance utilisant toute la puissance électrique pour générer le champ magnétique plutôt que de la dissiper en chaleur. Le Cern



exploite 25 kilomètres d'aimants supraconducteurs refroidis par de l'hélium pour guider les particules.

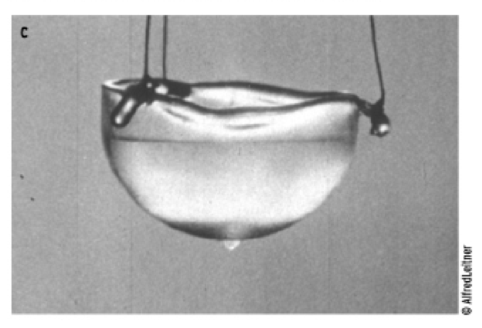
Plus proches de nous, les systèmes hospitaliers d'imagerie par résonance magnétique (IRM) ont besoin de champs magnétiques très forts que l'on produit avec des aimants supraconducteurs. Le maintien du courant y est même superflu. Pour créer l'aimant, un courant est envoyé dans le câble supraconducteur qui constitue la bobine et qui est bouclé sur lui-même. Le courant circule sans dissipation tant que le supraconducteur est maintenu à suffisamment basse température, réalisant un aimant permanent d'une puissance énorme.

L'effet Meissner et les vortex sont au cœur de systèmes de lévitation magnétique, dont des trains, actuellement à l'étude. On pourrait même imaginer transporter l'électricité sans pertes (les pertes actuelles sont d'environ 10 à 15 %) des centrales jusqu'aux consommateurs. Dans un contexte où la lutte contre le réchauffement climatique est devenue un enjeu essentiel, on pourrait économiser une centrale sur dix. Toutefois, le coût de la cryogénie sur de longues distances freine le déploiement de ces technologies. Des lignes de courant supraconductrices ont néanmoins déjà été posées dans des situations où l'installation de nouvelles lignes est extrêmement difficile ou coûteuse. C'est le cas par exemple à Long Island, aux États-Unis : ici, les nombreux câbles normaux (typiquement en cuivre) sont avantageusement remplacés par un câble unique supraconducteur transportant la même quantité de courant. Un développement plus large dépend de la mise au point de meilleures solutions de refroidissement ou de nouveaux supraconducteurs opérant à des températures plus élevées.

Une conséquence inattendue de la nature même de la supraconductivité est la fabrication de détecteurs de champ magnétique ultrasensibles. Cette propriété des supraconducteurs est fondée sur l'effet Josephson qui se manifeste par l'apparition d'un courant entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche non supraconductrice (isolante ou non). On a ainsi élaboré des détecteurs de champ magnétique mesurant des champs de 10 femtoteslas (de l'ordre d'un dix-milliardième du champ magnétique terrestre). Ces champs magnétiques sont moins intenses que ceux créés par les battements d'un cœur, voire par l'activité des neurones. Ces dispositifs sont mis en œuvre dans des sondes non invasives, notamment pour la magnétocardiographie. De nombreuses autres applications des supraconducteurs sont aujourd'hui à l'étude : des moteurs, des limiteurs de courants...

Notons que, à l'instar du cas des semi-conducteurs et d'autres composants électroniques, la physique quantique qui semblait si ésotérique est en fait omniprésente dans notre vie quotidienne et a eu des impacts majeurs sur notre société. Il est aussi important de remarquer qu'une grande partie de ces applications ne pouvait pas être anticipée avant les découvertes fondamentales correspondantes. En d'autres termes, l'ampoule n'est pas une bougie améliorée de même que la LED n'est pas une ampoule perfectionnée. Ainsi, une recherche fondamentale forte a conduit, en seulement une vingtaine d'années, à des applications inédites.

DE L'HÉLIUM DANS TOUS SES ÉTATS. Dans un fluide normal, des collisions entre les particules et des impuretés *(a)* conduisent à une diminution du courant et donc à une viscosité finie pour le fluide. Grâce à la mécanique quantique, un grand nombre de bosons peuvent et doivent être dans le même état quantique en dessous d'une certaine température. Une collision changerait alors l'état d'une seule particule, ce qui est interdit par le principe d'indiscernabilité *(b)*. En conséquence, le fluide coule sans aucune viscosité *(c, de l'hélium superfluide remonte les bords du récipient et forme une goutte en dessous)*.



© AlfredLeitner

Vers une troisième révolution quantique ?

Lors de la première révolution quantique, la physique quantique nous a donné toute l'électronique sur laquelle est fondée notre société de la communication et de l'information. D'autres aspects plus subtils tels que la supraconductivité, conséquences du principe d'indiscernabilité et de l'intrication de la fonction d'onde, ont également trouvé leur place dans notre quotidien. C'est selon certains, la seconde révolution quantique, toujours en cours, avec d'autres conséquences telles que la cryptographie quantique ou le calcul quantique *(voir Les gardiens de notre vie privée, par A. Eckert, page 40, et L'ordinateur quantique en kit, par Ch. Monroe, page 62)*.

Au niveau des matériaux, on peut espérer bien plus dans ce XXIe siècle qui commence et peut-être une troisième révolution quantique. En effet, l'essentiel de notre compréhension des matériaux et la majeure partie de ce qui a été décrit précédemment ignorent ou traitent de façon extrêmement simple les interactions des particules.

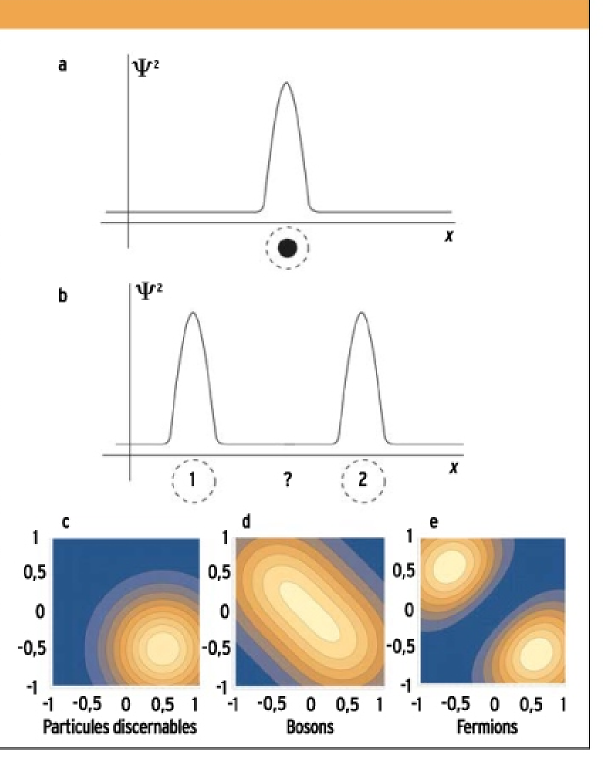
Un élément central qui nous permet ce traitement aussi cavalier est la théorie du liquide de Fermi. Cette théorie montre que même lorsque des particules interagissent, certains objets peuvent être vus comme des objets composites, mais pratiquement libres (un peu comme un atome constitué de ses nucléons en interaction forte peut être vu comme une simple « bille »). Cette théorie a été

L'INDISCERNABILITÉ

En mécanique quantique, la probabilité de trouver une particule en un point x de l'espace est fournie par le carré de la fonction d'onde (Ψ). Ce n'est qu'en faisant la mesure que l'on sait avec certitude où est la particule *(a)*. Si la fonction d'onde est importante en deux endroits de l'espace *(b)*, on ne connaîtra l'endroit de la particule *(1 ou 2)* qu'après avoir fait la mesure.

Quand il y a plus d'une particule, le fait qu'elles soient indiscernables est particulièrement important. En *c*, on observe le carré de la fonction d'onde de deux particules discernables, la première étant centrée en 0,5 et la deuxième en – 0,5 (l'axe horizontal est la coordonnée de la première particule, l'axe vertical celui de la deuxième). On voit que le maximum de la fonction d'onde (elle croît du bleu au jaune) est bien à ces coordonnées. Lorsque les particules sont indiscernables, la fonction d'onde change radicalement. Ainsi, pour les bosons, elle doit être symétrique. En *d*, on voit que maintenant la fonction d'onde ne sait plus si c'est la première particule en 0,5 et la deuxième en – 0,5 ou l'inverse. La conséquence est que la probabilité de trouver les deux particules au même endroit (par exemple 0) est notablement renforcée.

En revanche, dans le cas de fermions, la fonction d'onde doit être antisymétrique. En *e*, on observe le même effet précédent : on ne sait pas quelle particule est en 0,5 ou – 0,5. Cependant, à cause de l'antisymétrie, la probabilité de trouver les deux particules au même endroit est strictement de zéro, car la fonction d'onde doit s'annuler. C'est le principe d'exclusion de Pauli qui interdit à deux fermions d'être dans le même état quantique.



incroyablement fructueuse, car elle nous a permis d'utiliser nos connaissances sur des systèmes quantiques presque libres et donc de comprendre des phénomènes physiques allant des semi-conducteurs aux supraconducteurs.

Cependant, si l'on souhaite trouver de nouveaux matériaux, par exemple capables de transformer (partiellement) la chaleur ou la lumière en un courant électrique utilisable, afin de stocker de l'information dans stocker de l'information en utilisant la nature quantique de l'électron lui-meme, on devra exploiter les possibilités offertes par les interactions.

Il reste donc tout un univers de propriétés à découvrir dans des matériaux pour lesquels la théorie des liquides de Fermi échoue. Dans de tels matériaux – nommés pudiquement des « non-liquides de Fermi » –, les interactions jouent un rôle crucial et s'ajoutent à tous les effets quantiques dont nous avons parlé. Cela représente un formidable défi intellectuel, mais cela permet aussi d'utiliser toutes les possibilités des matériaux.

Un bon exemple de cette richesse est la découverte de nouveaux supraconducteurs opérant à des températures supérieures à celle de l'azote liquide, et donc bien au-dessus de celles de tous les supraconducteurs connus à l'époque de la théorie BCS. Ces matériaux semblent fonctionner selon un mécanisme différent de la théorie BCS, et les interactions jouent certainement un rôle important dans leurs propriétés.

article

• S. BALIBAR, The discovery of superfluidity, *J. of Low Temperature Physics*, vol. 146, 2007 : arxiv.org/abs/physics/0611119.

internet

• Un site sur les bases de la physique quantique avec des petites animations : www.toutestquantique.fr

• La révolution quantique, 5 conférences par des spécialistes mondiaux : www.colloque.ch/archives/2010/

• Un dossier sur la supraconductivité par la RTS : http://bit.ly/PLS-RTS-Sup

• Un site à l'occasion des 100 ans de la supraconductivité: www.supraconductivite.fr/fr/

De nombreux autres matériaux offrent des effets similaires. Si le XXe siècle a été le siècle des liquides de Fermi, il est très probable que le XXIe siècle exigera la solution au problème des interactions.

Vers un nouveau *James Bond* ?

Il s'agit d'un problème magnétiquement difficile à résoudre. Le comportement collectif d'un très grand nombre de particules en interaction donne lieu à une physique radicalement nouvelle, et qui ne peut être déduite de l'étude d'un petit nombre de particules. Traiter simultanément les effets d'interactions sur 10^{23} particules tout en tenant pleinement compte de leur nature quantique et en particulier du principe d'indiscernabilité met à mal nos méthodes et résiste encore fortement aux études numériques. Pour s'y attaquer, de nouvelles idées et méthodes sont donc nécessaires. Une aide inattendue dans ce domaine est venue d'un autre domaine de la physique, celui des atomes ultrafroids, avec lesquels on a pu réaliser des versions contrôlées de certains des modèles utilisés pour résoudre ces problèmes. Deux communautés de physiciens, ceux de la matière condensée et ceux des gaz d'atomes ultrafroids, unissent leurs efforts face à une question épineuse.

À la clé, on peut s'attendre à quelques surprises qui bouleverseront notre quotidien. Peut-être que ce sera l'occasion d'une troisième révolution quantique… et d'un nouvel épisode de *James Bond* !

UNIVERSITE PARIS SUD - ORSAY

Magistère de Physique Fondamentale d'Orsay

RECHERCHE ENSEIGNEMENT INDUSTRIE



http://www.magistere.u-psud.fr/

magphy@magistere.u-psud.fr

Tél : 01 69 15 58 52

- Une formation complète et approfondie à la recherche et par la recherche en physique
- Un large choix d'options permettant un parcours personnalisé : tous les secteurs de la physique fondamentale et appliquée, mais aussi l'électronique, l'informatique, la biophysique, la géophysique, ...
- Une préparation spécifique à l'AGREGATION de physique
- Une très large ouverture internationale

Les gardiens de notre **vie privée**

Les méthodes de chiffrement actuelles ne sont pas aussi fiables qu'on le pense. Comment alors protéger nos données et nos communications ? Grâce à la cryptographie quantique.

Artur EKERT, professeur à l'Institut de mathématiques d'Oxford, dirige le Centre des technologies quantiques de l'université de Singapour.

Renato RENNER est directeur de recherche à l'Institut de physique théorique de l'École polytechnique de Zurich, en Suisse.

Jenn Brown/Mondolithic Studio

L'ESSENTIEL

- La réalisation d'un ordinateur quantique rendrait caduques nos méthodes de cryptage.
- Des méthodes de chiffrement fondées sur des propriétés quantiques, dont l'idée a été émise il y a plus de vingt ans, pourraient contrer cette menace.
- Des chercheurs ont montré que la cryptographie quantique peut assurer une confidentialité parfaite.
- Plusieurs dispositifs de cryptage quantique sont déjà en service dans le monde.

L'écrivain américain et cryptographe amateur Edgar Allan Poe constatait dans sa nouvelle *Le Scarabée d'or* (1843) : « On peut affirmer sans ambages que l'ingéniosité humaine ne saurait concocter un code secret que l'ingéniosité humaine ne puisse résoudre. » Dès lors, sommes-nous condamnés à devoir renoncer à la confidentialité de nos communications, quels que soient nos efforts pour protéger notre vie privée ?

L'histoire des communications secrètes nous incite à répondre « oui ». De fait, les exemples ne manquent pas pour illustrer comment les efforts des meilleurs codeurs ont toujours été rattrapés par l'ingéniosité des décrypteurs. La cryptographie quantique, imaginée il y a près de trente ans, pourrait changer le cours de l'histoire. Et l'on se prend à rêver de systèmes de chiffrement fiables.

La paranoïa, un atout

Dans le domaine du chiffrement, être paranoïaque est un atout. S'interroger de façon systématique sur les qualités et les défauts d'un système de chiffrement aide à se prémunir des mauvaises surprises. Les questions suivantes sont alors naturelles : nos secrets sont-ils à l'abri d'adversaires qui détiennent une capacité technologique supérieure ? Peut-on faire confiance aux fournisseurs des systèmes de chiffrement ? Et même, peut-on avoir confiance en nous-même, en notre libre arbitre ? Les systèmes de chiffrement modernes ne sont pas toujours à

la hauteur de nos espérances, mais la physique quantique peut nous offrir des solutions efficaces.

L'alliée de demain en matière de chiffrement est la physique quantique, mais elle est aussi le domaine de recherche dont les progrès mettent en péril les systèmes de chiffrement actuels. En effet, nos courriels et nos données bancaires, bien que chiffrés, ne sont pas à l'abri d'avancées techniques dont profiteraient les indiscrets. L'une des plus grandes menaces aujourd'hui est la possibilité d'un ordinateur quantique. Un tel dispositif, décrypterait rapidement les messages chiffrés par les meilleurs systèmes utilisés aujourd'hui, mais fondés sur la physique classique.

L'alliée de tous les dangers

Par exemple, une méthode de chiffrement très répandue est le système RSA, proposé en 1977. Son principe est fondé sur deux clés, l'une publique et l'autre privée *(voir l'encadré page ci-contre)*. Une personne désirant vous envoyer un message chiffré utilisera votre clé publique, connue de tous. Mais seule la clé privée, que vous seul connaissez, permet d'inverser la procédure pour récupérer le message en clair. Les deux clés ne sont pas arbitraires : la clé publique est un très grand nombre, égal au produit de deux nombres premiers qui constituent la clé privée. Ainsi, une façon d'attaquer le système pour décrypter le message consiste à déterminer les nombres premiers dont est composée la clé publique. Or la factorisation d'un grand nombre est un problème dit difficile, car il requiert beaucoup de calculs qui dépassent les capacités des ordinateurs actuels. Avec le système RSA, vos données sont *a priori* bien protégées.

La monogamie… des corrélations quantiques assorties à un libre arbitre, même faible, suffisent pour protéger notre vie privée.

Cependant, en 1994, le mathématicien Peter Shor, alors aux laboratoires d'AT&T-Bell, a montré qu'un ordinateur quantique pourrait factoriser de grands nombres assez rapidement. L'algorithme de Shor rendrait ainsi le système RSA obsolète, à condition que l'on parvienne à fabriquer un ordinateur quantique ! Dans quelle mesure cet horizon est-il lointain ? On l'ignore. Ainsi, la sécurité des meilleures méthodes actuelles de chiffrement repose sur la lenteur du progrès technologique.

La quête d'autres façons de chiffrer nos données est donc raisonnable. Pour y parvenir, on doit bien comprendre les exigences d'une communication parfaitement sécurisée. En substance, tout ce dont nous avons besoin pour construire un chiffrement parfait est de partager une séquence de bits aléatoires, la « clé de chiffrement ». Deux utilisateurs (Alice et Bob) partagent la clé, qu'ils utilisent pour communiquer secrètement grâce à une procédure de chiffrement. Le masque jetable, ou chiffre de Vernam est une méthode simple et supposée inviolable. Ici, la clé est une suite de caractères au moins aussi longue que le message à chiffrer. Chaque lettre du message est combinée à un caractère de la clé, dont on additionne les valeurs (A = 1, B = 2, etc.) pour donner une nouvelle lettre.

On suppose robuste la méthode tant que le masque est une suite aléatoire de caractères et que chaque masque n'est utilisé qu'une fois. Même si elle connaît la méthode générale de chiffrement, une tierce personne – Ève – qui intercepte le message chiffré ne sera pas en mesure d'en tirer des informations utiles sans la clé. Mais cette méthode pose un problème, celui de la distribution de la clé : comment Alice et Bob peuvent-ils se transmettre cette dernière en toute sécurité ? Les méthodes de cryptographie asymétrique à deux clés, telles que RSA, contournent la difficulté. Cependant, comme nous l'avons vu, elles pourraient un jour devenir vulnérables.

La cryptographie quantique offre une solution alternative au problème de la distribution des clés. En s'appuyant sur des propriétés des systèmes quantiques, Alice et Bob pourraient échanger certaines informations afin de construire une clé commune. Ils seraient aussi en mesure de savoir si ces informations ont été interceptées et, le cas échéant, de décider de définir une nouvelle clé.

L'incertitude, une solution idéale

La distribution quantique des clés a d'abord été proposée en 1984 par Charles Bennett, chercheur chez IBM, et Gilles Brassard, alors à l'université Cornell. La sécurité de la transmission de la clé y est garantie par le principe d'incertitude de Heisenberg, selon lequel certaines paires de propriétés physiques, telles la position et la quantité de mouvement d'une particule, sont complémentaires et ne peuvent être connues avec précision simultanément. Cette idée a été appliquée à la polarisation de photons *(voir l'encadré pages 44)*. Puis, en 1991, l'un de nous (A. Ekert) a proposé un dispositif de distribution quantique des clés reposant sur la « monogamie de l'intrication quantique », propriété de certaines corrélations quantiques qui ne peuvent être partagées avec plus d'une personne. Nous y reviendrons.

L'idée d'utiliser des phénomènes quantiques pour améliorer le secret des communications n'était au début qu'une simple curiosité académique, mais, avec les progrès des technologies, elle a été reprise par les physiciens expérimentateurs et finalement développée en une proposition commerciale viable *(voir l'encadré page 46)*.

En théorie, la cryptographie quantique offre le système de chiffrement le plus sécurisé. En pratique, cependant, tout système peut présenter

des failles de conception, qui exposent les données chiffrées à des attaques. De telles failles peuvent être involontaires, résultant de l'ignorance ou de la négligence d'individus honnêtes qui conçoivent les systèmes de chiffrement quantique ; mais elles peuvent aussi être malveillantes, implantées subrepticement par des adversaires puissants.

Puisque certains des défauts peuvent nous être inconnus, comment avoir la certitude que personne n'intercepte nos communications ? Ce maillon faible semblait incontournable : aussi efficace que soit le système de chiffrement utilisé, tout espion technologiquement plus avancé (NSA, FBI...) aura le dessus. Or la cryptographie quantique ne serait pas exposée aux failles possibles du système. Elle peut en effet garantir la confidentialité avec un minimum d'ingrédients : d'une part, des corrélations monogames, à savoir des liens entre grandeurs physiques que seuls Alice et Bob peuvent mesurer ; d'autre part, une petite dose de « libre arbitre », défini ici comme la capacité de faire des choix indépendants de tout ce qui est préexistant, donc des choix imprévisibles.

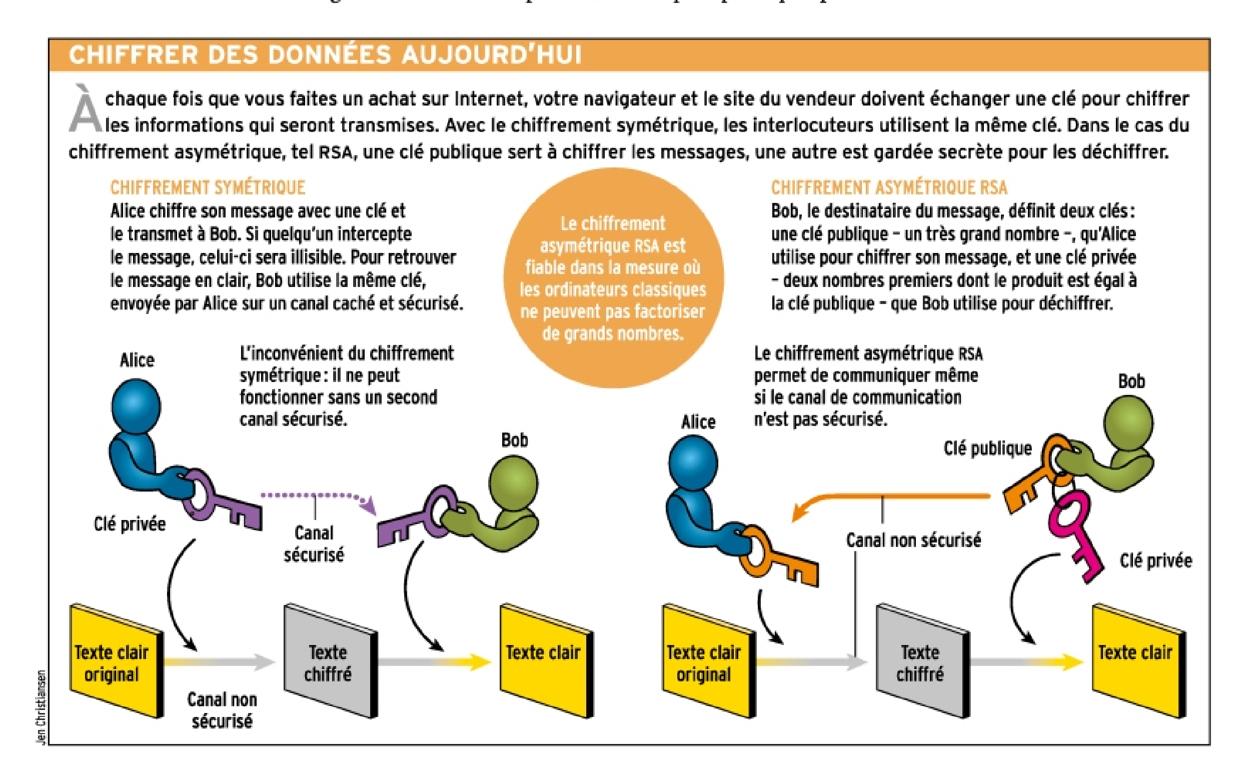
Ces conditions suffisent pour créer et distribuer des clés sûres. Plus étonnant, elles assurent que, même si nous utilisons des dispositifs de provenance inconnue ou douteuse, voire fabriqués par nos ennemis, la sécurité des données est assurée.

Évidemment, quelques précautions sont de mise : les dispositifs de chiffrement doivent être placés dans des lieux bien isolés pour empêcher toute fuite des données enregistrées servant à construire la clé de chiffrement, et seules des personnes de confiance doivent y avoir accès. Dans ces conditions, on montre qu'un test statistique suffit pour valider la sécurité du système, même sans aucune connaissance de son fonctionnement interne. On parle de cryptographie « indépendante du dispositif ». Ces dernières années, des progrès rapides ont permis de confirmer la fiabilité de ce type de cryptographie, qui constitue l'un des domaines de recherche les plus actifs en sciences de l'information quantique.

Des pièces de monnaie magiques

Nous avons présenté les concepts essentiels de la cryptographie quantique. Mais il reste à clarifier les notions de corrélation monogame et de libre arbitre et à voir comment les mettre en œuvre. Comme nous l'avons souligné, le problème crucial est celui de la distribution de la clé de chiffrement : pour que leur communication reste confidentielle, Alice et Bob doivent trouver un moyen de générer et se partager les bits de la clé. Comment faire ? Dans un premier temps, imaginons un système fictif qui illustre les notions de corrélations monogames et de libre arbitre.

Supposons que l'on dispose de deux pièces de monnaie liées de façon magique, de telle sorte qu'elles présentent toujours le même côté lorsqu'on les tire à pile ou face (les deux résultats étant équiprobables). Alice et Bob, chacun muni d'une pièce, peuvent alors lancer ces pièces en notant « 0 » pour face et « 1 » pour pile. Après plusieurs lancers,



la chaîne binaire obtenue, la clé, est aléatoire et connue simultanément d'Alice et de Bob.

Cette clé est-elle secrète ? Pas nécessairement. Ève pourrait fabriquer une pièce supplémentaire, magiquement liée à celles détenues par Alice et Bob. Les trois pièces concordant toujours, Ève connaîtrait aussi les bits obtenus par Alice et Bob.

À l'évidence, pour que le secret soit garanti, Alice et Bob doivent pouvoir faire quelque chose qui échappe au contrôle d'Ève. Par exemple, Alice et Bob peuvent avoir le choix entre deux pièces différentes (A_1 ou A_2 pour Alice, B_1 ou B_2 pour Bob). Pour chaque lancer, chacun n'utilise qu'une pièce et il est interdit de lancer ses deux pièces en même temps. On suppose les liens magiques tels que les pièces d'Alice et de Bob donnent toujours un résultat identique, sauf quand ils lancent A_1 et B_2, qui donnent toujours un résultat opposé. Cette magie peut être résumée par les quatre conditions suivantes : $A_1 = B_1$; $B_1 = A_2$; $A_2 = B_2$; $B_2 \neq A_1$.

Ces conditions sont clairement contradictoires : il est impossible d'assigner à A_1, A_2, B_1 et B_2 des valeurs telles que les quatre conditions soient simultanément satisfaites. Mais il faut se rappeler qu'Alice et Bob ne peuvent lancer qu'une pièce chacun, et qu'ils ne peuvent donc tester qu'une seule des quatre conditions à la fois ; cela ne conduit à aucune contradiction.

Mais si, par exemple, Alice enfreint la règle et lance ses deux pièces A_1 et A_2 en même temps, que se passe-t-il ? Supposons qu'Alice obtienne deux faces ou deux piles ($A_1 = A_2$) ; alors Bob n'a pas d'autre choix que de lancer B_1, parce que c'est le seul lancer compatible avec les conditions des pièces magiques. De même, si Alice obtient une pièce face et une pièce pile ($A_1 \neq A_2$), le seul choix qui reste à Bob est de lancer B_2.

Clonage interdit

Ainsi, lorsque Alice lance ses deux pièces, elle prive Bob de sa liberté de choisir la pièce qu'il veut tirer. Cette situation bizarre implique qu'Alice ne peut pas lancer ses deux pièces en même temps, sous peine de contradictions. Cela implique aussi que les pièces magiques ne peuvent pas être clonées. Si Ève avait une pièce Z constituant un clone de A_1, lorsque Alice lance A_2, on retrouverait des contradictions comme précédemment.

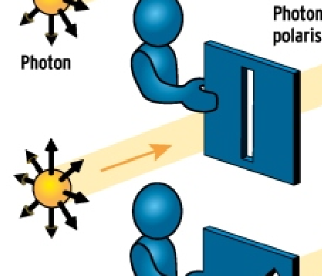
En conclusion, si les choix d'Alice et de Bob sont libres, les corrélations doivent être monogames, c'est-à-dire qu'aucune pièce tierce ne peut être corrélée à A_1, A_2, B_1 ou B_2. Cela redonne à Alice et Bob l'avantage sur Ève : ni elle, ni personne d'autre ne peut fabriquer une pièce qui correspondra toujours avec l'une quelconque des pièces détenues par Alice et Bob.

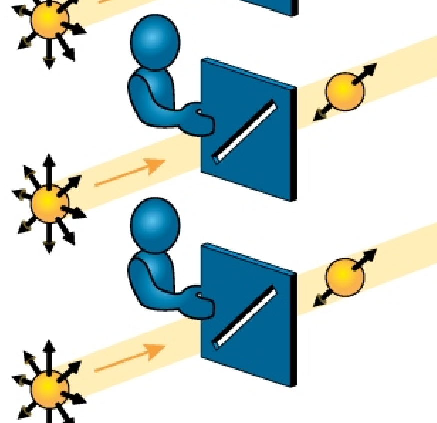
Tous les ingrédients de la distribution sécurisée des clés sont désormais en place. Concrètement, pour créer une clé de chiffrement, Alice et Bob lancent leurs pièces magiques. À chaque lancer, Alice et Bob choisissent au hasard et indépendamment l'un de l'autre la pièce concernée. Après le lancer, ils annoncent publiquement la pièce que chacun a choisie, mais pas le résultat obtenu. Comme les pièces vérifient les conditions énoncées précédemment, Alice et Bob savent ce que l'autre a obtenu : un résultat identique, sauf quand A_1 et B_2 ont été lancés, auquel cas les deux résultats sont opposés. Ève n'a aucun moyen de connaître le résultat puisqu'elle ne peut pas cloner les pièces. Pour établir une clé plus longue, Alice et Bob répètent simplement la procédure autant de fois que nécessaire.

Remarquons qu'Alice et Bob n'ont pas besoin de faire des hypothèses sur la provenance des pièces. Tant que les pièces vérifient les quatre conditions des pièces magiques, la sécurité du chiffrement est garantie. Pour s'assurer que les pièces vérifient effectivement ces conditions et n'ont pas été truquées

CHIFFRER SES DONNÉES GRÂCE À LA PHYSIQUE QUANTIQUE

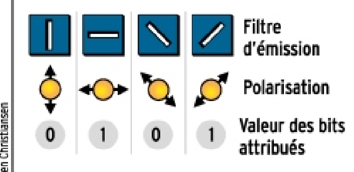
En cryptographie quantique, la distribution d'une clé se fait grâce à un flux de photons polarisés (présentant une direction de spin particulière). Si une tierce personne tente de mesurer la polarisation de ces photons en chemin, le seul acte de la mesure modifie la polarisation de certains photons. L'émetteur et le destinataire du message pourront alors savoir que quelqu'un a tenté de lire l'échange. Le dispositif présenté ici est celui imaginé en 1984 par Charles Bennett et Gilles Brassard.





ENVOI ET RÉCEPTION DE PHOTONS POLARISÉS

L'émetteur *(en bleu)* transmet une série de photons qui passent par l'un des quatre filtres polarisants. Chaque filtre polarise le photon selon une direction, à laquelle on assigne une valeur de bit 0 ou 1 *(voir ci-dessous)*. Le destinataire *(en vert)* mesure la polarisation après le passage du photon par l'un de ses deux filtres.



Jen Christiansen

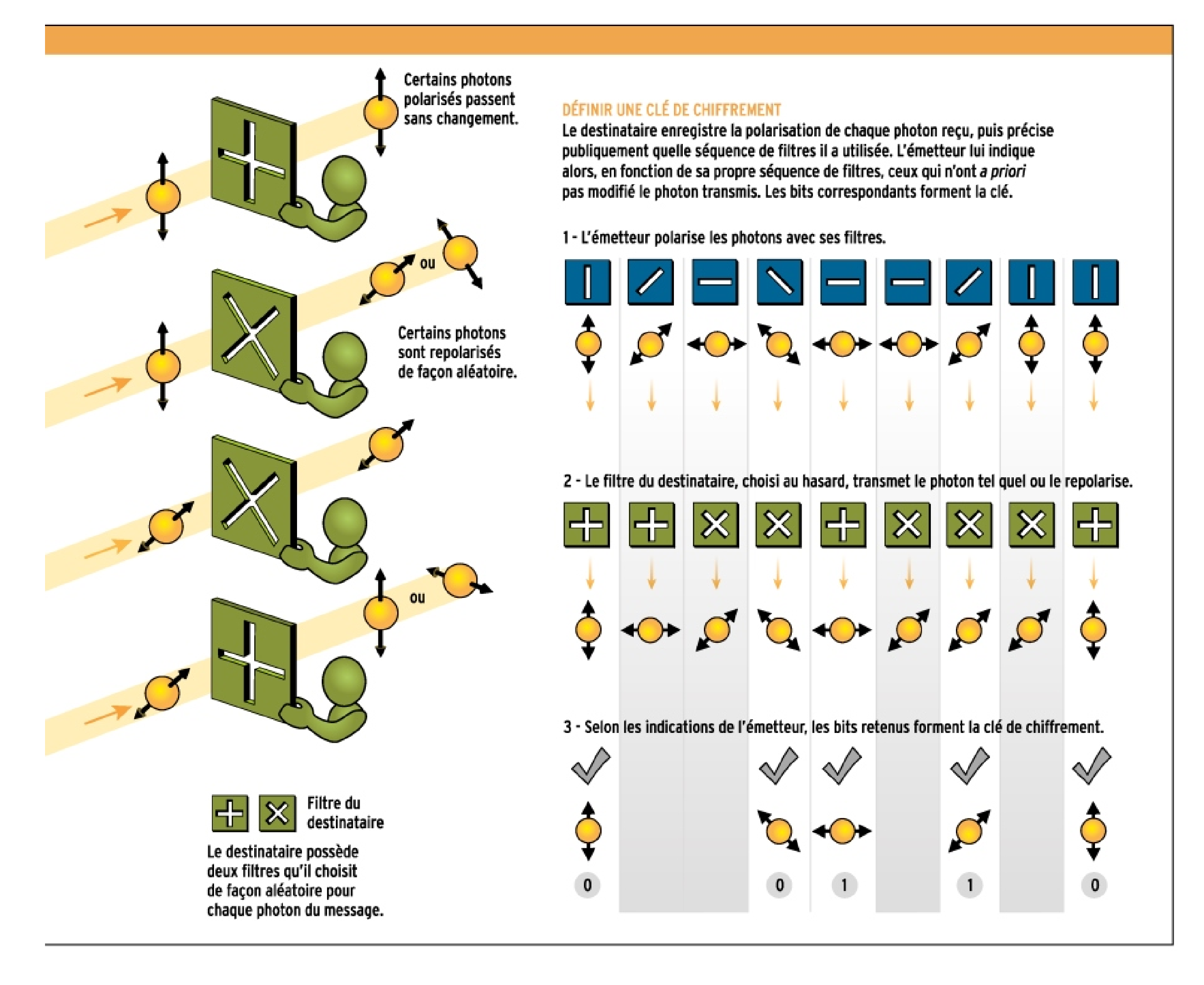
ou clonées par un ennemi, Alice et Bob se communiquent les résultats d'un certain nombre de tirages choisis au hasard et vérifient s'ils sont en accord avec les conditions des pièces magiques. Ces résultats dévoilés publiquement sont ensuite éliminés, et la clé est composée des résultats des lancers restants, qui n'ont jamais été révélés publiquement. Si Alice et Bob remarquent un désaccord dans les tirages comparés, cela signifie que quelqu'un a essayé d'intercepter la clé. Alice et Bob jettent l'ensemble des bits de la clé et font un nouvel essai avec un autre jeu de pièces.

Bien sûr, Alice et Bob doivent s'assurer que le résultat des lancers non révélés, qui sert à construire la clé, est sous bonne garde. Il faut aussi supposer qu'Alice et Bob communiquent publiquement sans que personne ne modifie leurs messages ou n'usurpe leur identité. Dès lors, le secret de la clé est uniquement fondé sur la monogamie des corrélations magiques et sur une hypothèse anodine, mais essentielle : Alice et Bob peuvent choisir librement la pièce à lancer.

Nous avons atteint notre objectif : Alice et Bob sont capables de générer et communiquer une clé de façon sécurisée. Il n'y a qu'un ennui… les corrélations magiques n'existent pas ! En d'autres termes, nous ne connaissons aucun processus physique qui puisse les reproduire. Mais tout n'est pas perdu, car il existe des corrélations physiques suffisamment « magiques » pour nos besoins : bienvenue dans le monde quantique !

Pour concevoir des systèmes quantiques de chiffrement, nous faisons appel à des photons polarisés, c'est-à-dire de polarisation bien définie. La polarisation d'un photon correspond à la direction de son spin (son moment cinétique intrinsèque).

Quand on mesure la polarisation selon une direction, seuls deux résultats sont possibles, indiquant si la polarisation du photon juste après la



Le chiffrement quantique est déjà disponible

Le principe de chiffrement quantique proposé par Charles Bennett et Gilles Brassard en 1984 est plus simple à mettre en pratique que celui conçu par Artur Ekert en 1991. Les premiers dispositifs sont déjà testés et fonctionnent depuis une dizaine d'années.

La cryptographie quantique a vraiment commencé à sortir des laboratoires au début des années 2000, lorsque les physiciens ont trouvé une solution au refroidissement des dispositifs afin de limiter la perte de photons. Ils ont remplacé l'azote liquide, peu pratique pour un usage à grande échelle, par des systèmes électriques.

Les dispositifs de chiffrement ne prennent pas forcément un grand volume, et peuvent être contenus dans l'équivalent d'une mallette. Une petite diode laser envoie de la lumière sur un filtre si opaque qu'il ne laisse passer, en moyenne, qu'un photon à la fois. Ce photon est polarisé selon une certaine direction pour porter la valeur 0 ou 1 d'un bit. Le photon est ensuite envoyé dans une fibre optique reliée au dispositif du destinataire, qui mesure à son tour la polarisation du photon.

Dans la procédure de Bennett et Brassard, l'expéditeur et le destinataire se concertent pour déterminer les bits qui formeront la clé de chiffrement de leur message. Un espion ne peut deviner la valeur de ces bits, et s'il interceptait les photons lors de leur transmission dans la fibre, cela perturberait leur polarisation. En comparant les mesures sur un échantillon de photons, l'expéditeur et le destinataire détectent aisément si un tiers a tenté d'« écouter » leur échange.

De tels dispositifs existent déjà. La société Battelle Memorial Institute, aux États-Unis, a ainsi installé un réseau entre deux de ses sites pour échanger des rapports financiers et d'autres données confidentielles. La distance parcourue par la fibre optique est limitée à quelques dizaines de kilomètres, car au-dessus, le signal est fortement détérioré par l'absorption des photons par la fibre.

Les chercheurs de Battelle travaillent avec la firme suisse ID Quantique pour mettre au point des réseaux plus étendus à l'aide de boîtes relais. Celles-ci, refroidies à −40 °C, capteraient les photons polarisés et les réémettraient à l'identique. Ces boîtes relais devraient cependant être parfaitement scellées et sécurisées pour empêcher toute intrusion malveillante. Par sécurité, la détection d'une tentative d'intrusion conduirait alors le système à s'éteindre aussitôt.

En attendant que cette idée aboutisse, des projets pour relier la réserve fédérale américaine à ses banques régionales sont à l'étude. Et le gouvernement chinois voudrait installer un dispositif similaire pour son usage et celui des institutions financières entre Shanghai et Beijing, distantes de 2 000 kilomètres.

La mise en place à grande échelle de ces systèmes de cryptographie avec fibres optiques est confrontée à un autre obstacle. Les connexions s'accommodent mal d'un réseau ramifié. On retrouve là les difficultés des débuts du téléphone au XIX[e] siècle et ses énormes quantités de câbles pour établir des contacts point à point.

Mais déjà de nouveaux systèmes sont imaginés, toujours plus petits et portatifs. Le secteur pourrait croître très vite dans les années à venir.

Sean Bailly, *Pour la Science*

mesure est parallèle ou orthogonale à la direction de mesure. Notons 1 et 0 ces résultats.

Pour le système de chiffrement d'Alice et Bob, les photons polarisés doivent être, en plus, « intriqués », c'est-à-dire que les états les décrivant sont indissolublement liés. La mesure de la polarisation d'un des deux photons intriqués fixe son état de polarisation et, simultanément et instantanément, fixe celui de l'autre photon, même très éloigné. Cette intrication a ainsi un caractère non local : les états des deux photons sont corrélés, quand bien même aucun signal ne serait échangé entre les deux particules.

Albert Einstein, attaché au principe de localité, était un farouche critique de l'intrication quantique. En 1935, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il a formulé ses objections sous la forme d'un paradoxe (noté EPR). Pour ces trois physiciens, l'intrication quantique implique soit que les deux particules échangent des informations qui se propagent plus vite que la lumière (ce qui violerait la théorie de la relativité restreinte), soit que la physique quantique est incomplète et que des « variables cachées », inconnues, donnent l'illusion de l'intrication quantique.

En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a formalisé la question du paradoxe EPR sous la forme d'inégalités qui portent son nom, et qui sont violées si l'intrication est non locale.

Les inégalités de Bell jouent un rôle crucial dans le système de chiffrement quantique. Voyons comment. On remplace les pièces magiques d'Alice et de Bob par des paires de photons intriqués. Une source émet ces paires, dont un photon est envoyé à Alice et l'autre à Bob. Au lieu de lancer des pièces magiques, Alice et Bob mesurent la polarisation des photons selon des directions particulières, définies par des angles notés α_1 et α_2 pour Alice et β_1 et β_2 pour Bob. Pour chaque paire de photons intriqués, Alice et Bob choisissent chacun une direction de mesure de la polarisation. Les photons étant intriqués, ils répondent de façon coordonnée aux mesures effectuées séparément.

L'intrication quantique joue le rôle de la connexion magique entre les pièces, mais la situation n'est pas aussi simple. Avec les photons, la probabilité qu'Alice et Bob trouvent le même résultat est égale à $\cos^2(\alpha - \beta)$. On définit une grandeur, notée ε, qui quantifie la déviation par rapport aux corrélations des pièces magiques ($\varepsilon = 0$ correspond au cas des pièces magiques). On montre alors que pour tout choix d'angles, il est impossible d'annuler ε. La valeur physique la plus petite admissible pour ε est 0,146. La question est donc de savoir si une valeur non nulle de ε autorise un système de chiffrement fiable. La réponse est oui.

Les inégalités à l'épreuve

Lorsque $\varepsilon \geqslant 1/4$, les corrélations sont dites classiques ; dans cette situation, on peut supposer, sans que l'on se heurte à des contradictions, que les polarisations selon les angles α_1, α_2, β_1 et β_2 ont une valeur bien définie avant la mesure. Ce n'est plus le cas quand $\varepsilon < 1/4$; dans cette situation,

articles

- **G. BRASSARD, Cryptography in a quantum world, *Lecture Notes in Computer Science* (Springer), vol. 9587, pp 3-16, 2016.**
- **A. EKERT et R. RENNER, The ultimate physical limits of privacy, *Nature*, vol. 507, pp. 443-447, 2014.**
- **A. EKERT, Quantum cryptography based on Bell's theorem, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, n° 6, pp. 661-663, 1991.**

supposer que les polarisations ont des valeurs préalables à la mesure conduit à la violation de l'une au moins des quatre conditions des pièces magiques.

Le fait de ne pas pouvoir affecter une valeur numérique à une grandeur physique avant de la mesurer est une bizarrerie inhérente à la physique quantique. Des inégalités statistiques, telles que $\varepsilon \geqslant 1/4$, que l'on appelle communément les inégalités de Bell, ont été violées dans un certain nombre d'expériences *(voir l'article Le débat Einstein-Bohr est complètement clos, par A Aspect, page 22)*.

L'une des conséquences de la violation des inégalités de Bell est que la probabilité qu'Ève devine correctement un résultat particulier ne peut dépasser $(1+4\varepsilon)/2$. Si ε est suffisamment petit, Alice et Bob sont en mesure de construire une clé presque parfaite en utilisant une technique dite d'amplification de la confidentialité. L'idée est la suivante : imaginez que vous ayez deux bits et que votre adversaire en connaisse au plus un (sans que vous sachiez lequel). Additionnez les deux bits modulo 2 : le bit résultant sera inconnu de votre adversaire. Avec davantage de bits, il existe des moyens bien plus élaborés pour amplifier la confidentialité.

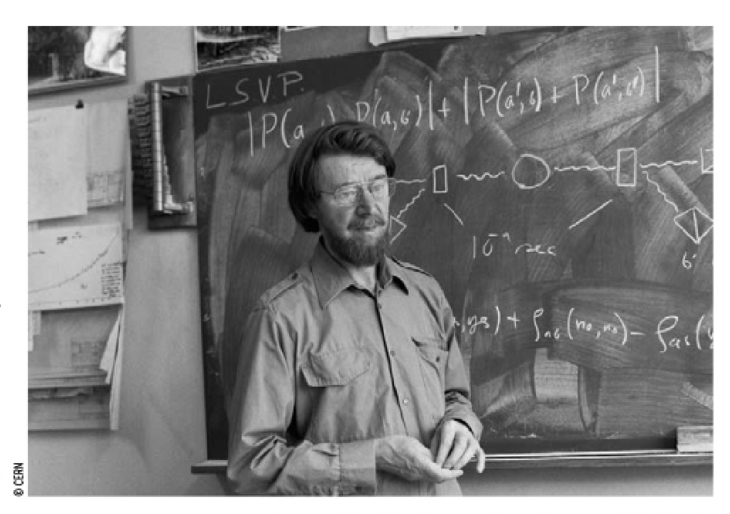
Pour résumer, à chaque fois que l'on donne à Alice et Bob des dispositifs qui produisent des résultats corrélés, ils peuvent faire tourner le protocole de distribution des clés, complété par un « test d'honnêteté » statistique afin d'estimer ε. Si cette valeur est suffisamment petite, disons $\varepsilon = 0{,}15$, le résultat final, après amplification de la confidentialité, est une clé de chiffrement parfaite.

Doper le libre arbitre

Certains points sont à vérifier avant que l'on soit sûr de notre système. En particulier, Alice et Bob peuvent-ils se faire confiance ? Sont-ils libres de leurs choix, ou bien sont-ils contrôlés par une force qui leur échappe ? Nous parlions de paranoïa... Nous avons déjà souligné l'importance du libre arbitre dans le processus. Le choix de la pièce à lancer ou de la direction de polarisation à mesurer doit être fait librement et indépendamment. En général, dans les réalisations pratiques, des générateurs de nombres (pseudo)aléatoires se chargent de tels choix. Mais le hasard qu'ils simulent est-il satisfaisant ?

Si une fraction des choix faits par nos générateurs de nombres aléatoires ne peut être déterminée par l'adversaire, alors la confidentialité est encore possible, parce que le caractère aléatoire local peut être amplifié. L'amplification du hasard est obtenue avec des protocoles indépendants du dispositif, et fonctionne même si la fraction de hasard initial est arbitrairement petite.

Cela semble bizarre et trop beau pour être vrai, mais nous avons montré qu'il est, en théorie, possible d'amplifier le libre arbitre et la confidentialité pour obtenir une méthode de chiffrement totalement fiable. C'est toutefois assez difficile à mettre en pratique.



© CERN

LE PHYSICIEN JOHN BELL a formulé les inégalités qui portent son nom, en 1982. La théorie quantique prévoit que ces inégalités sont violées. Cette violation, qui a été vérifiée, permet de construire des cles de cryptographie presque parfaites.

Nous l'avons vu, un système de distribution quantique des clés fondé sur la violation des inégalités de Bell a été proposé en 1991. L'année suivante, une démonstration de principe a été réalisée à la Defence Evaluation and Research Agency (aujourd'hui QinetiQ) à Malvern, au Royaume-Uni. Cependant, le caractère « indépendant du dispositif » (c'est-à-dire sans connaître parfaitement l'origine du dispositif) de ce protocole n'a été démontré qu'en 2007. Pour ce faire, il a fallu plus d'une décennie pour s'accorder sur une définition utile du secret, ne serait-ce que pour des dispositifs fiables, et pour réaliser une longue série de tests prenant en compte toutes les ressources quantiques qu'Ève peut mettre à son service. Un défi majeur consiste à rendre ces arguments de sécurité quantitatifs et robustes vis-à-vis du bruit et des imperfections du système.

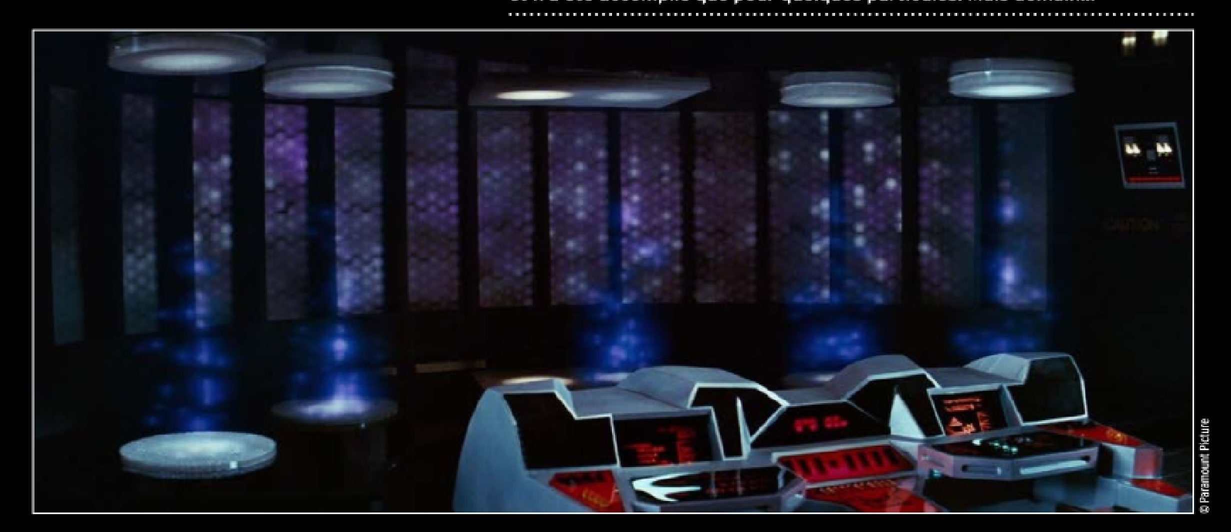
Pour finir, soulignons que les protocoles indépendants des dispositifs et leurs preuves de sécurité n'ont pas encore atteint le degré de sophistication qui est maintenant la norme pour le scénario dépendant des dispositifs. En particulier, des efforts sont nécessaires pour améliorer l'efficacité des protocoles de distribution des clés, et pour identifier les conditions dans lesquelles des dispositifs non éprouvés peuvent être réutilisés sur de multiples cycles de ces protocoles.

Les fondements quantiques du principe de chiffrement décrit ici sont aussi sujets à des interrogations. Nous avons implicitement supposé qu'il n'y a rien au-delà de la théorie quantique. Cependant, Alice et Bob peuvent imaginer qu'Ève a des capacités « postquantiques », c'est-à-dire des technologies plus puissantes que les technologies quantiques, reposant sur des phénomènes physiques non encore découverts et non décrits par la physique quantique. Vous avez dit paranoïa ?

La physique quantique à portée de main

La physique quantique ne se cantonne pas aux laboratoires de recherche et à l'infiniment petit. Elle est au cœur de nombreuses applications de notre vie quotidienne et explique plusieurs phénomènes courants. La preuve en images.

LA TÉLÉPORTATION COMME DANS STAR TREK est théoriquement possible grâce à la physique quantique et surtout au mécanisme d'intrication qui relie les parties même éloignées d'un système quand elles ont interagi. Aujourd'hui, la téléportation n'est qu'un transfert d'états quantiques et n'a été accomplie que pour quelques particules. Mais demain...



© Paramount Picture



© DR

LES MÉMOIRES de nos ordinateurs portables et de tous nos appareils électroniques doivent leurs extraordinaires capacités à une compréhension fine du comportement quantique des électrons et des atomes dans les matériaux semi-conducteurs.



© DR

LA PHOTOSYNTHÈSE, selon certains, devrait son efficacité à transformer la lumière en énergie à des processus quantiques. Des processus de cohérence quantique et d'intrication des pigments amélioreraient la collecte de lumière et les transferts d'électrons. Toutefois, ces hypothèses sont encore controversées.



© Parent Géry

LA COULEUR DES PIERRES PRÉCIEUSES (ici, un rubis) s'explique par la quantification de l'énergie dans les atomes qui les constituent ! Cette énergie ne peut prendre que certaines valeurs. Un rubis renvoie une lumière rouge traduisant les paliers d'énergie autorisés dans les quelques atomes de chrome que contient le minéral.

LE GPS fonctionne grâce à une armada de satellites qui nous envoient des signaux de façon à déterminer notre position par triangulation. Ces appareils en orbite sont synchronisés par des horloges atomiques dont le fonctionnement est fondé sur des processus quantiques.

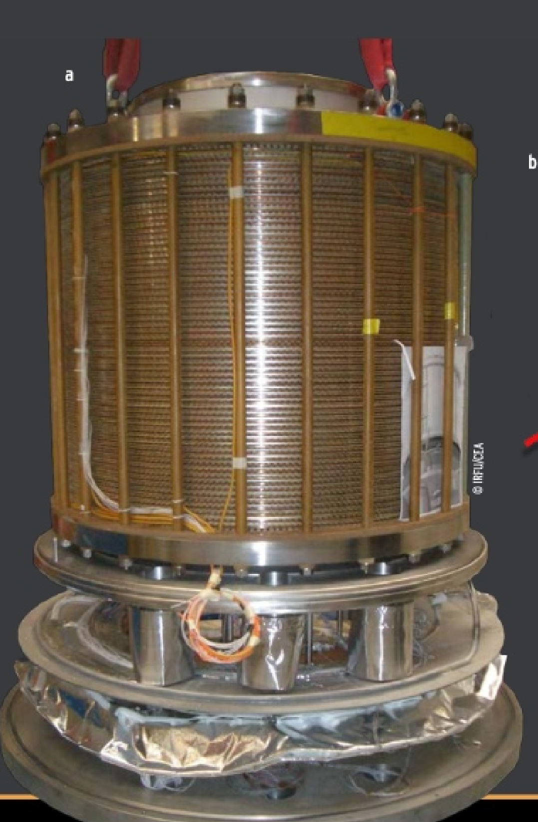


© Mileo/Shutterstock.com

LA FLAMME D'UNE GAZINIÈRE est bleue. Cette couleur résulte de la désexcitation des liaisons covalentes des molécules du gaz (méthane, propane...). Ce phénomène correspond au passage d'un niveau quantique d'énergie à un autre des électrons.

© DR

L'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE est fondée sur trois principes de la physique quantique. D'abord, les appareils ont besoin d'aimants supraconducteurs *(a)*, une propriété résultant d'interactions complexes des atomes et des électrons libres. Ces aimants puissants et stables servent à mettre en œuvre le deuxième aspect quantique, la résonance magnétique nucléaire *(b)* : placés dans un champ magnétique B, le moment magnétique des spins (les flèches bleues) des noyaux de certains atomes, notamment ceux d'hydrogène H *(b, les sphères bleues)* s'alignent. Des champs magnétiques oscillants plus faibles sont ensuite appliqués de façon à modifier cet alignement, ce qui conduit à un signal électromagnétique mesurable. Celui-ci est traité par des ordinateurs performants *(c)* pour fournir une image. C'est le troisième aspect quantique.



© IRFU/CEA

b

B

O

H

H

Résonance magnétique des protons (H) d'une molécule d'eau (H_2O) dans un champ magnétique (B).

c

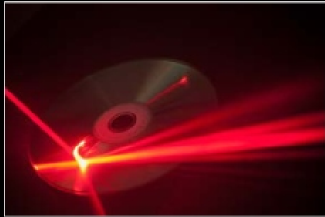


LES DÉTECTEURS CCD de nos appareils photo numériques exploitent la dualité onde-corpuscule de la lumière. Quand ils sont captés, les photons arrachent des électrons qui sont ensuite convertis en image.



© Skylines - nikkytok/Shutterstock.com

LE LASER (pour *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, soit amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement) et notamment celui que l'on utilise pour lire des CD, les DVD... est un rayonnement spatialement et temporellement cohérent. Il est produit par l'émission stimulée de photons par des atomes excités dans une cavité amplificatrice, par exemple entre deux miroirs.





LA MIGRATION DE CERTAINS OISEAUX serait facilitée par la perception du champ magnétique terrestre. Dans un des mécanismes proposés, et encore débattu, des électrons intriqués seraient l'élément clé de la détection.

© DR

LES BELLES LED qui nous éclairent de plus en plus exploitent comme le laser la désexcitation des électrons des atomes. Ici un semi-conducteur dont la nature influe sur la couleur produite émet des photons lorsqu'il est traversé par un courant.

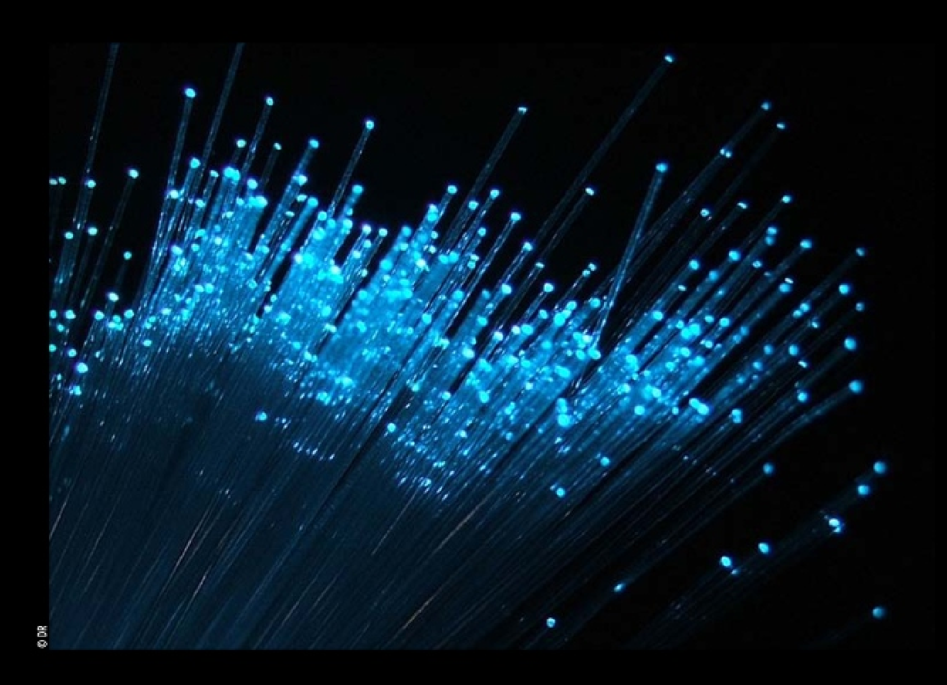


© Ledstiproom.blogspot.com



© Gyuszko-Photo

LES PANNEAUX SOLAIRES et les cellules photovoltaïques qui les constituent fonctionnent sur un principe similaire à celui des LED, mais inversé. L'électricité est produite par les photons du Soleil qui excitent les électrons des matériaux de la cellule.



© DR

LES FIBRES OPTIQUES transmettent les données à grande vitesse. Dans ces fils de verre ou de plastique, les informations circulent sous la forme d'impulsions optiques émises par une LED ou un laser : ces « flashs » correspondent à des signaux électriques qui ont été traduits par un transpondeur optique.

La **vie** est-elle aussi quantique ?

Contrairement à l'idée commune, la théorie quantique ne concerne pas seulement les électrons et les atomes. Elle s'applique aussi à plus grande échelle et jusqu'à divers processus biologiques chez les oiseaux, les plantes... et peut-être les humains.

Vlatko VEDRAL,
physicien, est professeur à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et à l'université nationale de Singapour.

Effet quantique, effet minuscule ? Dans les manuels de physique, la théorie quantique décrit les particules, les atomes, les molécules, bref, le monde microscopique, mais céderait le pas à la physique classique à l'échelle des poires, des gens ou des planètes. Il y aurait ainsi, quelque part entre la poire et la molécule, une frontière où prend fin l'étrangeté quantique et où commence le caractère familier des comportements décrits par la physique classique. L'idée que la théorie quantique se limite au monde microscopique est d'ailleurs très répandue dans le grand public. Elle est très souvent annoncée comme étant le cadre théorique nécessaire pour comprendre l'Univers aux plus petites échelles, la relativité s'occupant à l'autre bout du spectre de l'Univers aux plus grandes échelles. Ce cloisonnement du monde physique est un mythe.

Peu de physiciens attribuent aujourd'hui à la physique classique le même statut qu'à la physique quantique. À leurs yeux, la physique classique n'est qu'une approximation utile dans un monde qui est quantique à toutes les échelles. La discrétion des phénomènes quantiques à notre échelle ne tient pas à la taille en soi des systèmes, mais à la façon dont ils interagissent. Depuis quinze ans, les physiciens multiplient les expériences où se manifestent à l'échelle macroscopique des effets quantiques, dont on s'aperçoit qu'ils sont bien plus présents qu'on ne le soupçonnait. Ils pourraient même jouer un rôle dans nos cellules, l'orientation des oiseaux migrateurs, la photosynthèse des plantes !

Même les spécialistes qui consacrent leur carrière à la physique quantique doivent encore assimiler ce qu'elle dit vraiment sur la nature. Les comportements quantiques échappent au sens commun : ils nous forcent à repenser notre vision de l'Univers et à en accepter une nouvelle, peu familière.

Un chat mort-vivant

Pour un expert en théorie quantique, la physique classique est la version en noir et blanc d'un monde en couleurs. Les catégories de la physique classique ne suffisent plus à saisir le monde dans sa richesse. Dans la vision propagée par les vieux manuels, la richesse des teintes se dilue à mesure qu'augmente la taille. Isolées, les particules seraient quantiques ; en grand nombre, elles deviendraient classiques. Cette vision est fausse, et les premières indications de ce fait remontent à l'une des plus célèbres expériences de pensée de la physique : celle du chat de Schrödinger.

En 1935, l'Autrichien Erwin Schrödinger imagina une situation macabre pour illustrer comment le monde microscopique et le monde macroscopique sont inextricablement couplés, et ne peuvent être séparés par une frontière nette. Dans son scénario, un chat est enfermé dans un local contenant un flacon de gaz mortel, un compteur de radioactivité et un atome radioactif. Si le compteur détecte de la radioactivité, un mécanisme casse le flacon, et le chat meurt.

Le compteur, appareil macroscopique, ne peut que mesurer l'un des deux états classiques possibles de l'atome : « désintégré » ou « non désintégré ». Or, dans le monde quantique, un atome peut fort bien se trouver dans un état combinant les états « désintégré » et « non désintégré » : ce que l'on nomme un état

L'ESSENTIEL

- On croit souvent que la théorie quantique ne s'applique qu'aux systèmes minuscules : atomes, molécules, etc.
- Les lois quantiques s'appliquent en fait à tout et à toutes les échelles de taille, même si leurs manifestations passent parfois inaperçues.
- Les expériences des physiciens révèlent des effets quantiques dans un nombre croissant de systèmes macroscopiques.
- L'intrication est un effet quantique fondamental, qui peut être en jeu dans n'importe quels systèmes, y compris des organismes vivants.

LE ROUGE-GORGE FAMILIER vole de la Scandinavie à l'Afrique en s'orientant à l'aide du champ magnétique terrestre. L'oiseau percevrait avec ses yeux l'inclinaison de ce dernier grâce à un effet quantique à l'échelle macroscopique.

© Horgon/Shutterstock.com

superposé. Ainsi, si l'atome radioactif est dans cet état superposé, l'existence du mécanisme brisant le flacon implique que le chat se trouve dans un état combinant la possibilité d'être mort et celle d'être vivant, exactement comme l'état superposé de l'atome combine la possibilité qu'il soit désintégré ou non.

Pour plausible que soit le dispositif de Schrödinger, il est avant tout théorique. D'ailleurs, certaines nouvelles approches de la réalité mettent à mal cette idée *(voir l'entretien avec A. Auffèves, page 18)*. Pour autant, il a l'intérêt de mettre en évidence, qu'en principe au moins, l'étrangeté quantique des systèmes microscopiques se communique aux systèmes macroscopiques. Et il pose une question de fond : pourquoi les gens ne voient-ils que des chats soit vivants, soit morts et pas de chats morts-vivants ?

Des états très fragiles

D'après la vision actuelle, le monde semble bien décrit par la physique classique, parce que les interactions complexes d'un objet avec son environnement font très vite disparaître les particularités quantiques. L'information relative à l'état de santé d'un chat, par exemple, gagne rapidement son environnement sous la forme de photons et d'échanges de chaleur. Chaque phénomène quantique peut impliquer des états superposés du système en jeu (mort ou vivant), mais ces états, sauf un, tendent à disparaître. La fuite permanente d'information vers l'environnement est le mécanisme essentiel par lequel les états quantiques de superposition se détruisent, processus nommé décohérence.

Les gros systèmes sont davantage sujets à la décohérence que les petits, car ils laissent échapper plus d'informations. C'est pourquoi les physiciens tendent à associer la théorie quantique au monde microscopique. Dans de nombreux cas, toutefois, la perte d'information par un gros système peut être ralentie ou stoppée, ce qui met alors en évidence l'omniprésence des phénomènes quantiques.

Un phénomène quantique par excellence est l'intrication, qui transforme un ensemble de particules isolées en un tout indivisible. Son nom fut introduit en 1935 par Schrödinger dans le même article que celui où il discutait de son chat. En physique classique, les propriétés d'un système de particules peuvent toujours se ramener aux propriétés individuelles de ses composants. Ce n'est pas le cas avec un système quantique intriqué. Ainsi, un système constitué de deux particules intriquées a un comportement étonnant : même très éloignées, les particules qui le composent continuent à se comporter comme deux parties d'une entité indivisible ; c'est ce qui a conduit Einstein à parler d'« action fantomatique à distance ».

D'ordinaire, les physiciens parlent de l'intrication de paires de particules élémentaires, tels les électrons. L'une des propriétés des électrons est leur moment

Observer l'observateur

L'idée que la théorie quantique s'applique à tout dans l'Univers, y compris à nous, conduit à d'étranges conclusions. Prenons par exemple une variante de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, proposée par Eugene Wigner en 1961 et que David Deutsch, de l'université d'Oxford, a précisée en 1986.

Alice, physicienne, demande à son ami Bernard d'entrer dans la pièce où se trouvent le chat de Schrödinger et un dispositif qui traduit la désintégration d'un atome radioactif en poison pour le chat. Alice sait que l'atome a été préparé dans une superposition des états « désintégré » et « non désintégré », de sorte que le chat est à la fois mort et vivant. Comme convenu, Alice glisse un papier sous la porte, où Bernard doit lui indiquer si le chat est dans un état bien défini (mort ou vivant). Bernard répond que « oui ».

Insistons sur le fait qu'Alice ne demande pas si le chat est mort ou vivant, parce que cela impliquerait de forcer le résultat, en d'autres termes de défaire l'état intriqué du chat. Alice se contente de vérifier que son ami voit un chat soit vivant, soit mort, sans chercher à savoir duquel des deux états il s'agit précisément.

Alice n'ayant pas défait l'état intriqué du chat, la communication avec Bernard est, en théorie quantique, une action réversible. En l'annulant, Alice annule aussi chacune des étapes franchies, de sorte que s'il était mort, le chat redevient vivant, le poison retrouve sa place et s'il était désintégré, l'atome cesse de l'être, tandis que Bernard ne se souvient plus d'avoir observé un chat soit mort, soit vivant.

Pour autant, Alice ne peut annuler l'existence du morceau de papier. Alice peut annuler l'observation, mais seulement d'une façon qui n'annule pas l'inscription se trouvant sur le papier. Ainsi, le papier garde la preuve que Bernard a bien observé l'état du chat.

Cela conduit à une conclusion étonnante : Alice a réussi à inverser l'observation parce qu'elle a évité l'effondrement de l'état intriqué. Pour elle, Bernard est dans un état tout aussi intriqué que le chat, tandis que pour Bernard, l'état intriqué du chat s'est défait, de sorte qu'il voit un chat soit mort, soit vivant, ce dont le papier atteste... Ainsi, l'expérience met en contradiction deux observations d'un même fait : pour Alice, le chat reste mort-vivant, alors que pour Bernard, il est soit mort, soit vivant.

Créer la même situation avec un observateur humain n'est guère réaliste, mais les physiciens peuvent tenter quelque chose d'équivalent avec un système plus simple. Anton Zeilinger et ses collègues, de l'université de Vienne, l'ont fait en faisant rebondir un photon sur un grand miroir. Si le photon est réfléchi, le miroir subit un recul, mais si le photon est transmis, le miroir reste immobile. Dans un état intriqué transmis-réfléchi, le photon joue le rôle de l'atome radioactif ; le miroir, constitué de milliards d'atomes, joue celui du chat et de Bernard. Son recul ou pas est analogue à la vie ou à la mort du chat et à son observation par Bernard. Et tout le processus peut être inversé en faisant revenir le même photon sur le miroir.

En tentant de réaliser ce genre d'expérience de pensée, Wigner et Deutsch, puis Zeilinger suivent les pas de Schrödinger, d'Einstein et de tous les physiciens qui se sont confrontés à l'étrangeté de la théorie quantique. Tant que ces expériences sont restées irréalisables, y réfléchir semblait vain, car la théorie fonctionnait en pratique. Cela change aujourd'hui, de sorte qu'il devient urgent d'essayer de comprendre enfin vraiment la physique quantique.

cinétique (ou angulaire) intrinsèque, nommé *spin* (mot anglais qui signifie « tournoyer »). En simplifiant, on peut se représenter les électrons comme de minuscules toupies qui tournent soit dans le sens des aiguilles d'une montre, soit dans le sens inverse, autour d'un axe susceptible de pointer dans n'importe quelle direction : horizontalement, verticalement, à 45 degrés, etc. Pour mesurer le spin d'un électron, il faut d'abord choisir une direction, puis déterminer le sens du spin par rapport à l'axe choisi.

Supposons que deux électrons se comportent comme le prescrit la physique classique. Faisons alors en sorte que l'un des électrons tourne dans le sens horaire autour d'un axe horizontal, et l'autre tourne dans le sens inverse autour du même axe ; de cette façon, le spin total, c'est-à-dire la somme des spins des deux électrons, est nul. Les axes de rotation des électrons restant fixes dans l'espace, le résultat d'une mesure va dépendre de l'angle entre la direction de mesure et l'axe de rotation des électrons. Si l'on mesure les deux spins selon un axe horizontal, on verra qu'ils tournent dans des directions opposées ; en revanche, une mesure dans la direction verticale ne détectera de rotation pour aucune des particules.

La concertation des spins

Pour des électrons réels, donc quantiques, les choses sont très différentes. Tout d'abord, il est possible de préparer le système des deux électrons dans un état de spin total nul, même sans avoir spécifié l'état individuel de chacune des particules. Quand on mesure le spin d'un des électrons, on trouve, au hasard, soit que l'électron tourne dans le sens horaire, soit qu'il tourne dans le sens inverse. C'est comme si l'électron décidait par lui-même dans quel sens tourner. Néanmoins, quelle que soit la direction de mesure choisie (la même pour les deux électrons), on constate que les deux spins mesurés sont toujours opposés. Tout se passe comme si la mesure d'un des spins, opérée le long d'un axe, obligeait l'autre spin à prendre la valeur opposée.

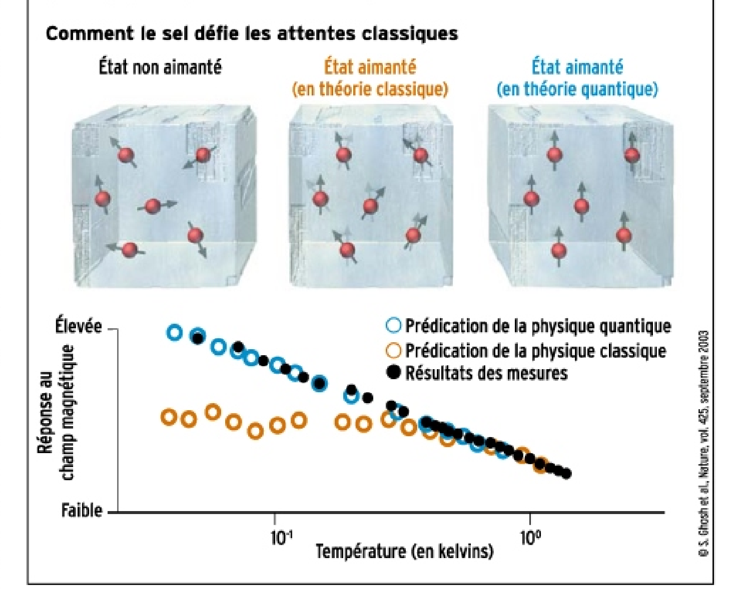
Comment les deux spins se « concertent-ils » ? Cela reste mystérieux. En outre, la mesure du spin de l'une des particules dans la direction horizontale n'empêche plus d'obtenir aussi un résultat dans la direction verticale, ce qui suggère que les particules n'ont pas d'axes de rotation déterminés. En un mot, les résultats des mesures effectuées sur les deux électrons sont corrélés d'une façon que la physique classique n'explique pas.

La plupart des mises en évidence expérimentales de l'intrication n'impliquent que quelques particules. Un système composé de nombreuses particules est en effet difficile à isoler de l'environnement. Ses constituants ont une probabilité bien plus grande de s'intriquer avec des particules non contrôlées de l'environnement, ce qui détruit leurs interconnexions originelles. Autrement dit, dans les termes servant à décrire la décohérence, trop d'informations s'échappent du système dans l'environnement, ce qui confère au système un comportement classique, non quantique. On comprend donc que pour tous ceux qui cherchent à exploiter l'intrication, par exemple pour construire des ordinateurs quantiques, le principal défi est la difficulté de préserver l'intrication.

En 2003, une expérience a prouvé que des systèmes de plus grande taille peuvent rester intriqués quand on peut limiter ou contrecarrer la fuite d'information. Gabriel Aeppli, du University College de Londres, et ses collègues ont placé un morceau de fluorure de lithium dans un champ magnétique *(voir l'encadré page ci-contre)*. Dans ce champ, les spins des atomes de ce sel se comportent comme de petites aiguilles aimantées susceptibles de pivoter pour s'aligner le long des lignes de champ, une réaction nommée susceptibilité magnétique. En outre, les interactions des atomes produisent une sorte de pression collective qui pousse chacun des spins à s'aligner plus rapidement. En faisant varier l'intensité du champ magnétique, les expérimentateurs ont mesuré à quelle vitesse les atomes s'alignent. Ils ont constaté que les spins s'alignent

UN GRAIN DE SEL QUANTIQUE

Selon une idée répandue, la physique quantique cesserait d'être efficace, donc nécessaire, pour décrire les systèmes à grand nombre de particules. Or les physiciens expérimentateurs commencent à mettre leur grain de sel dans ces idées : ils ont montré que, dans certaines circonstances, les spins des atomes d'un grain de cristal de certains sels forment un unique état macroscopique de spin, ce que l'on nomme un état intriqué. Le phénomène se remarque à la vitesse avec laquelle les spins atomiques s'alignent dans un champ magnétique externe, qui coïncide avec ce que prédit la théorie quantique, mais pas la théorie classique.



bien plus vite que ne le laissait prévoir l'intensité de leurs interactions mutuelles. Selon les auteurs de la recherche, la seule explication possible est qu'un état intriqué macroscopique s'est formé à partir des états individuels de spins des quelque 10^{20} atomes formant le morceau de sel…

Afin d'éviter les effets de décohérence de l'agitation thermique, l'équipe de Gabriel Aeppli a réalisé ses expériences à très basse température – quelques millikelvins seulement. Depuis, Alexandre Martins de Souza, du Centre brésilien de recherche en physique de Rio de Janeiro, et ses collègues ont mis en évidence au sein de matériaux tels que le carboxylate de cuivre la possibilité d'obtenir une intrication macroscopique à température ambiante, voire supérieure *(voir l'encadré ci-contre)*.

Les records se succèdent

Dans les systèmes qu'ils étudient, l'interaction des spins est assez forte pour contrecarrer l'agitation thermique. Dans d'autres cas, il est possible d'obtenir une intrication macroscopique au moyen d'une force extérieure qui annule les effets de l'agitation thermique. Les physiciens ont ainsi créé de l'intrication au sein de systèmes toujours plus grands et à des températures de plus en plus élevées ; cela va d'ions piégés par des champs électromagnétiques jusqu'à des atomes ultrafroids disposés en réseau, en passant par des bits quantiques supraconducteurs. Dernier exemple en date, l'équipe de Justin Bohnet, du NIST (l'institut américain des normes et de la tehcnologie), à Boulder, dans le Colorado, a annoncé en juin 2016 l'intrication de 219 ions de béryllium piégés par des champs électriques et magnétiques. Deux mois plus tôt, Roman Schmied, de l'université de Bâle, en Suisse et ses collègues ont publié un article dans lequel ils montrent qu'ils ont intriqué, dans un condensat de Bose-Einstein, 480 atomes de rubidium. Les records se succèdent et les objets intriqués sont de plus en plus gros.

Ces systèmes sont analogues au chat de Schrödinger. Considérons un atome ou un ion : ses électrons peuvent se trouver près du noyau ou ailleurs, ou les deux à la fois. Un tel électron se comporte donc comme l'atome radioactif contenu dans la cage du chat de Schrödinger, qui est à la fois dans l'état désintégré et dans l'état non désintégré. Indépendamment de ce que fait l'électron, l'atome peut par ailleurs bouger, par exemple vers la gauche ou vers la droite. Ce mouvement joue le rôle du chat mort ou vivant. En manipulant l'atome à l'aide de lasers, les physiciens parviennent à coupler les états de position de l'électron et de mouvement de l'atome. Par exemple, on peut faire en sorte que si l'électron est proche du noyau, l'atome se déplace à gauche, et que si l'électron est plus loin du noyau, l'atome se déplace à droite. Ainsi, l'état électronique se trouve intriqué avec l'état de mouvement de l'atome, de la même façon que la désintégration radioactive est intriquée avec l'état du chat. On peut ainsi avoir un état intriqué avec des superpositions, où le félin à la fois vivant et mort est remplacé par un atome se déplaçant à la fois vers la gauche et vers la droite.

D'autres expériences transposent à plus grande échelle cette idée de base, de façon qu'un immense nombre d'atomes se retrouvent dans un état intriqué, impossible en physique classique. Or, si l'on peut conférer un état intriqué à des solides même lorsqu'ils sont grands et chauds, il n'y a qu'un pas à faire pour se demander si l'intrication pourrait aussi être présente dans les êtres vivants.

Un tel « organisme quantique » pourrait être le rouge-gorge familier *Erithacus rubecula*, un étonnant petit oiseau, qui migre chaque année entre la Scandinavie et l'Afrique équatoriale. Il semble effectuer ce périple de 13 000 kilomètres sans difficultés et, étonnamment, sans se perdre. Comment fait-il ?

Le rouge-gorge a-t-il une sorte de boussole intérieure ? Dans les années 1970, les époux Wolfgang et Roswitha Wiltschko, de l'université de Francfort en Allemagne, ont capturé des rouges-

QUANTIQUE ET DE PLUS EN PLUS GROS

Les effets quantiques ne se limitent pas aux particules subatomiques. Ils apparaissent également dans des expériences sur des systèmes plus grands. En voici quelques exemples.

Observation d'une figure d'interférences entre fullerènes, montrant pour la première fois que les molécules, comme les particules subatomiques, se comportent comme des ondes.

Intrication de chaînes de 8 ions de calcium maintenus dans un piège à ions. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables de le faire sur des chaînes de 14 ions de calcium.

Intrication des mouvements vibratoires (plutôt que du spin ou d'autres propriétés internes) d'ions de béryllium et de magnésium.

Observation d'une susceptibilité magnétique très élevée au sein de carboxylates métalliques à une température de 290 kelvins, qui ne peut s'expliquer que par l'intrication de milliards d'atomes de ces sels.

Observation d'effets quantiques qui augmentent l'efficacité de la photosynthèse dans deux espèces d'algues marines.

Intrication de trois bits quantiques au sein d'un circuit supraconducteur. La procédure utilisée pourrait servir à obtenir des systèmes quantiques de toute taille.

Mise en vibration d'une microplanche de 40 micromètres de long (presque visible à l'œil nu) à deux fréquences en même temps.

Observation d'effets quantiques au sein de molécules géantes, dont une en forme de pieuvre contenant 430 atomes.

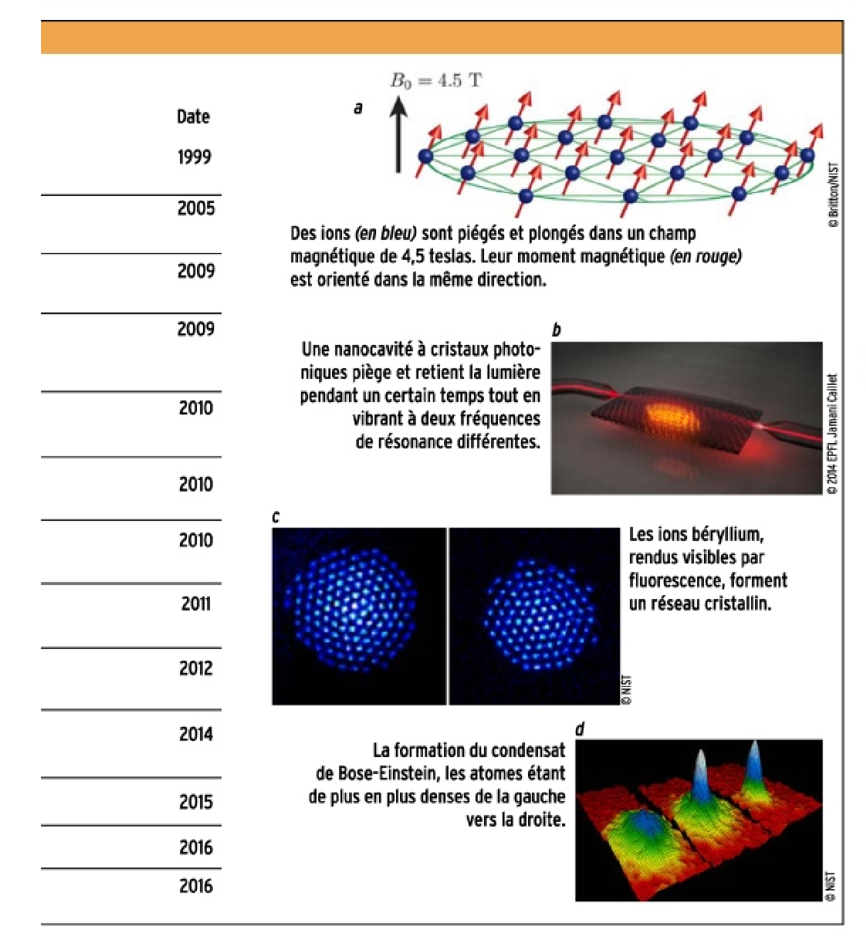
Un simulateur quantique de matériaux magnétiques constitué de 350 qubits chacun étant un ion béryllium *(figure a)*.

Mise au point d'un protocole expérimental pour démontrer l'intrication quantique au niveau macroscopique grâce à un système contrôlable par la lumière *(figure b)*.

Intrication de 3 000 atomes à l'aide d'une impulsion laser contenant un seul photon.

Intrication de 219 ions de béryllium *(figure c)*.

Intrication dans un condensat de Bose-Einstein de 480 atomes de rubidium *(figure d)*.



Des ions *(en bleu)* sont piégés et plongés dans un champ magnétique de 4,5 teslas. Leur moment magnétique *(en rouge)* est orienté dans la même direction.

Une nanocavité à cristaux photoniques piège et retient la lumière pendant un certain temps tout en vibrant à deux fréquences de résonance différentes.

Les ions béryllium, rendus visibles par fluorescence, forment un réseau cristallin.

La formation du condensat de Bose-Einstein, les atomes étant de plus en plus denses de la gauche vers la droite.

gorges ayant migré en Afrique et les ont placés dans un champ magnétique artificiel. Ils ont constaté que les rouges-gorges ne perçoivent pas les inversions de la direction du champ magnétique – ils ne distinguent pas le nord du sud –, mais qu'ils sont sensibles à l'inclinaison du champ magnétique terrestre, c'est-à-dire à l'angle que font les lignes de champ avec la surface terrestre. C'est, en fait, tout ce dont ils ont besoin pour s'orienter. Or, détail intéressant, les rouges-gorges dont on bande les yeux ne suivent plus le champ magnétique. Cela signifie que la boussole des rouges-gorges est dans leurs yeux.

En 2000, un physicien passionné par les oiseaux migrateurs, Thorsten Ritz, alors à l'université de Floride du Sud, propose avec ses collègues une explication : l'intrication. Selon son idée, inspirée des travaux de Klaus Schulten, de l'université de l'Illinois, la rétine d'un œil d'oiseau contiendrait une molécule où deux électrons forment une paire intriquée de spin total nul.

Dans le modèle théorique de Thorsten Ritz, quand cette molécule absorbe un photon de lumière visible, les électrons reçoivent assez d'énergie pour se séparer et devenir ainsi sensibles au champ magnétique terrestre. Si le champ magnétique est incliné, il affecte différemment les deux électrons, créant un déséquilibre qui modifie la réaction chimique subie par la molécule : on se retrouve avec deux populations de molécules distinctes. Des mécanismes traduisent cette différence en une impulsion nerveuse, que le cerveau de l'oiseau transforme en une image du champ magnétique terrestre. L'oiseau est ainsi doté d'un dispositif d'orientation macroscopique, qui ne relève pas de la physique classique.

Une rétine quantique ?

Bien qu'il n'y ait que des preuves indirectes de l'existence de ce mécanisme, Christopher Rodgers et Kiminori Maeda, de l'université d'Oxford, ont étudié en laboratoire des molécules semblables à celles considérées par Thorsten Ritz, et montré que l'intrication de leurs électrons les rend en effet sensibles aux champs magnétiques. D'après nos calculs, ces effets quantiques persistent dans un œil d'oiseau durant 100 microsecondes environ. Dans ce contexte, c'est une durée longue : le record de maintien d'un système artificiel de spins électroniques intriqués n'est que de quelque 50 microsecondes… Nous ignorons pour le moment comment un système naturel pourrait conserver aussi longtemps des effets quantiques, mais la réponse nous indiquerait comment protéger les ordinateurs quantiques de la décohérence.

En 2012, Brendon Lovett, du University College, à Londres, et ses collègues ont progressé dans la compréhension de cette perception. Auparavant, on imaginait que les mécanismes conduisant à la naissance de l'influx nerveux étaient plutôt d'ordre chimique. En fait, ils seraient plutôt physiques, les deux types de molécules pouvant modifier le champ électrique de leur voisinage. Il en résulterait une modification des capteurs de la rétine.

La photosynthèse – le mécanisme complexe par lequel les plantes convertissent l'énergie solaire en énergie chimique – est un autre processus biologique où l'intrication est peut-être en jeu. Dans les cellules végétales, la lumière incidente éjecte des électrons, qui s'acheminent tous vers un centre de réaction où ils déposent leur énergie et déclenchent les réactions chimiques nécessaires aux cellules des plantes. Or la physique classique n'explique pas l'efficacité presque parfaite de ce mécanisme.

Des expériences réalisées par plusieurs équipes, dont celle de Graham Fleming et Mohan Sarovar, de l'un iversité de Californie à Berkeley, ou celle de Gregory Scholes, de l'université de Toronto, soutiennent l'idée que le rendement élevé de la photosynthèse s'expliquerait par des propriétés quantiques.

En 2014, Alexandra Olaya-Castro et Edward O'Reilly, du University College, à Londres, ont


© Nature/A. O'Connell et al. © Shutterstock/Marco_Sc

ROGER FEDERER serait-il encore numéro un grâce à l'intrication de plusieurs états de position ? Ce serait un avantage énorme, mais il reste irréaliste pour un système de la taille d'un humain. Toutefois, Aaron O'Connel et Max Hofheinz, de l'université de Californie à Santa Barbara, ont réussi à placer une microplanche vibrante de 40 micromètres de long *(en bas, à gauche)* en plusieurs endroits à la fois, ou, plus exactement, dans un état quantique où se superposent plusieurs modes vibratoires.

montré que les chromophores (des molécules impliquées dans la photosynthèse) utilisent bel et bien des processus quantiques. Certains états de vibration des chromophores faciliteraient le transfert d'énergie lors du processus et contribuent à son efficacité. Plus précisément, les deux physiciens ont mis en évidence la manifestation d'une superposition d'états quantiques à température ambiante assistant un transfert cohérent d'énergie.

Un cerveau humain quantique ?

Dans un monde quantique, une particule prend tous les chemins à la fois, chacun étant affecté d'une certaine probabilité. Les champs électromagnétiques existant au sein des cellules végétales peuvent entraîner l'annulation mutuelle de certaines de ces trajectoires et le renforcement d'autres, réduisant les chances que l'électron fasse un détour peu économique et augmentant celles qu'il soit aiguillé directement vers le centre de réaction. L'intrication des états de position (chemins) possibles ne durerait qu'une fraction de seconde et ferait intervenir des molécules ne renfermant pas plus de 100 000 atomes. Existe-t-il des cas d'intrication plus vaste et plus persistante dans la nature ? Nous l'ignorons, mais la question a suscité l'émergence d'une nouvelle discipline : la biologie quantique.

Qu'en est-il de l'être humain ? Il y a une vingtaine d'années, le mathématicien Roger Penrose et le biologiste Stuart Hameroff ont proposé un modèle selon lequel notre cerveau, et plus particulièrement les microtubules des neurones abriteraient des états quantiques résistants à la décohérence. L'hypothèse est contestée, mais elle reste néanmoins intrigante.

Pour Schrödinger, un chat à la fois mort et vivant était une absurdité ; toute théorie faisant pareille prédiction ne pouvait qu'être défectueuse. Des générations de physiciens ont partagé ce malaise, pensant que la théorie quantique cessait de s'appliquer à grande échelle.

Pourtant les expériences suggèrent plutôt que la frontière entre le monde classique et le monde quantique n'est pas fondamentale, assez d'ingéniosité expérimentale suffisant à l'effacer. Et aujourd'hui, peu de physiciens pensent que la physique classique s'impose vraiment à quelque échelle que ce soit.

Ainsi, le fait que la théorie quantique s'applique à toutes les échelles nous oblige à nous confronter aux questions posées par son interprétation. Nous ne pouvons plus les réduire à des détails n'intervenant qu'aux petites échelles. Par exemple, l'espace et le temps sont en physique deux des concepts les plus fondamentaux, mais qui ne jouent qu'un rôle secondaire en physique quantique. L'intrication est le phénomène quantique essentiel. Elle lie entre eux des systèmes sans référence à l'espace ou au temps. S'il y avait véritablement une frontière à tracer entre les mondes quantique et classique, nous pourrions nous reposer sur le cadre spatiotemporel classique pour doter la théorie quantique d'un cadre similaire. Sans cette démarcation – en fait surtout parce que le monde classique n'existe pas –, nous n'avons plus besoin de ce cadre. Il nous faut plutôt chercher à expliquer l'espace et le temps comme des phénomènes émergeant d'une façon ou d'une autre d'une physique fondamentale dénuée de cadre spatiotemporel.

Cette idée pourrait nous aider à réconcilier la physique quantique avec l'autre pilier de la physique, la théorie de la relativité générale. Elle suppose que les objets ont des positions bien définies et ne sont jamais à plus d'un endroit à la fois, ce qui est en contradiction avec la physique quantique. De nombreux physiciens, comme Stephen Hawking, de l'université de Cambridge, pensent que la théorie de la relativité doit céder la place à une théorie plus profonde dans laquelle l'espace et le temps n'existent pas. L'espace-temps classique émergerait de l'intrication quantique par le processus de décohérence.

Une autre possibilité, plus intéressante encore, serait que la gravitation ne soit pas une force en elle-même, mais le bruit résiduel de l'action des autres forces de l'Univers engendré par le caractère flou des phénomènes quantiques. Cette idée de « gravitation induite » remonte aux années 1960 et au physicien et dissident soviétique Andreï Sakharov. Si elle devait se révéler pertinente, alors non seulement la gravitation y perdrait son statut de force fondamentale, mais aussi tous les efforts accomplis pour la « quantifier » seraient vains. Au niveau quantique, la gravitation ne pourrait même pas exister. De telles implications placent les physiciens dans un état intriqué de confusion et d'émerveillement. ■

livre

• **V. VEDRAL**, ***Decoding Reality : The Universe as Quantum Information***, **Oxford University Press, 2010.**

articles

• **J. BOHNET *et al.*, Quantum spin dynamics and entanglement generation with hundreds of trapped ions, 2016. arxiv.org/abs/1512.03756**

• **R. SCHMIED *et al.*, Bell correlations in a Bose-Einstein condensate, *Science*, vol. 352, pp. 441-444, 2016.**

• **R. McCONNELL *et al.*, Entanglement with negative Wigner function of almost 3,000 atoms heralded by one photon, *Nature*, vol. 519, pp. 439-442, 2015.**

• **T. FARROWA et V. VEDRAL, Classification of macroscopic quantum effects, *Optics Communications*, vol. 337, pp. 22-26, 2015.**

• **E. O'REILLY et A. OLAYA-CASTRO, Non-classicality of the molecular vibrations assisting exciton energy transfer at room temperature, *Nature Communications*, vol. 5, art. 3012, 2014.**

• **S. HAMEROFF et R. PENROSE, Consciousness in the Universe : A review of the 'Orch OR' theory, *Physics of Life Reviews*, vol. 11, pp. 39-78, 2014.**

L'ordinateur **quantique** en kit

Comment concevoir un ordinateur quantique ? L'une des pistes les plus prometteuses consiste à connecter de nombreux petits réseaux pour les faire travailler ensemble.

Christopher MONROE
est professeur de physique à l'université du Maryland et membre de l'institut Joint Quantum.

Robert SCHOELKOPF
est professeur de physique à l'université Yale et directeur de l'institut Yale Quantum.

Mikhail LUKIN
est professeur de physique à l'université Harvard et codirecteur du Centre MIT-Harvard pour les atomes ultrafroids.

Voilà deux décennies que les physiciens tentent d'exploiter les bizarreries du monde quantique microscopique dans l'espoir d'obtenir des avancées majeures en termes de traitement de l'information et de capacités de communication. En mettant à contribution plusieurs caractéristiques de la physique aux plus petites échelles de l'univers, des machines quantiques pourraient rendre triviales des tâches de calcul, de communication et de mesure que l'on pensait auparavant hors de portée. Pour ne citer qu'un exemple, un ordinateur quantique déchiffrerait des codes jugés indéchiffrables *(voir Les gardiens de notre vie privée, par A. Ekert, page 40)*.

De même, les machines quantiques stockeraient et communiqueraient de l'information avec une confidentialité garantie par les lois de la physique. Elles simuleraient également des processus chimiques complexes qui seraient autrement incalculables. Les systèmes quantiques renforceraient aussi la précision des horloges les plus précises du monde (les horloges atomiques). Ils pourraient enfin servir de capteurs miniatures suffisamment précis pour mesurer les propriétés de systèmes chimiques et biologiques à l'échelle atomique ou moléculaire.

Un tel potentiel explique pourquoi des géants de la technologie tels que Google et Intel, plusieurs start-up, des agences gouvernementales… misent gros sur ce domaine. La communauté académique elle aussi est inspirée : pour la seule année 2015, trois revues majeures ont publié plus de 3000 articles scientifiques mentionnant l'« informatique quantique » ou l'« information quantique ».

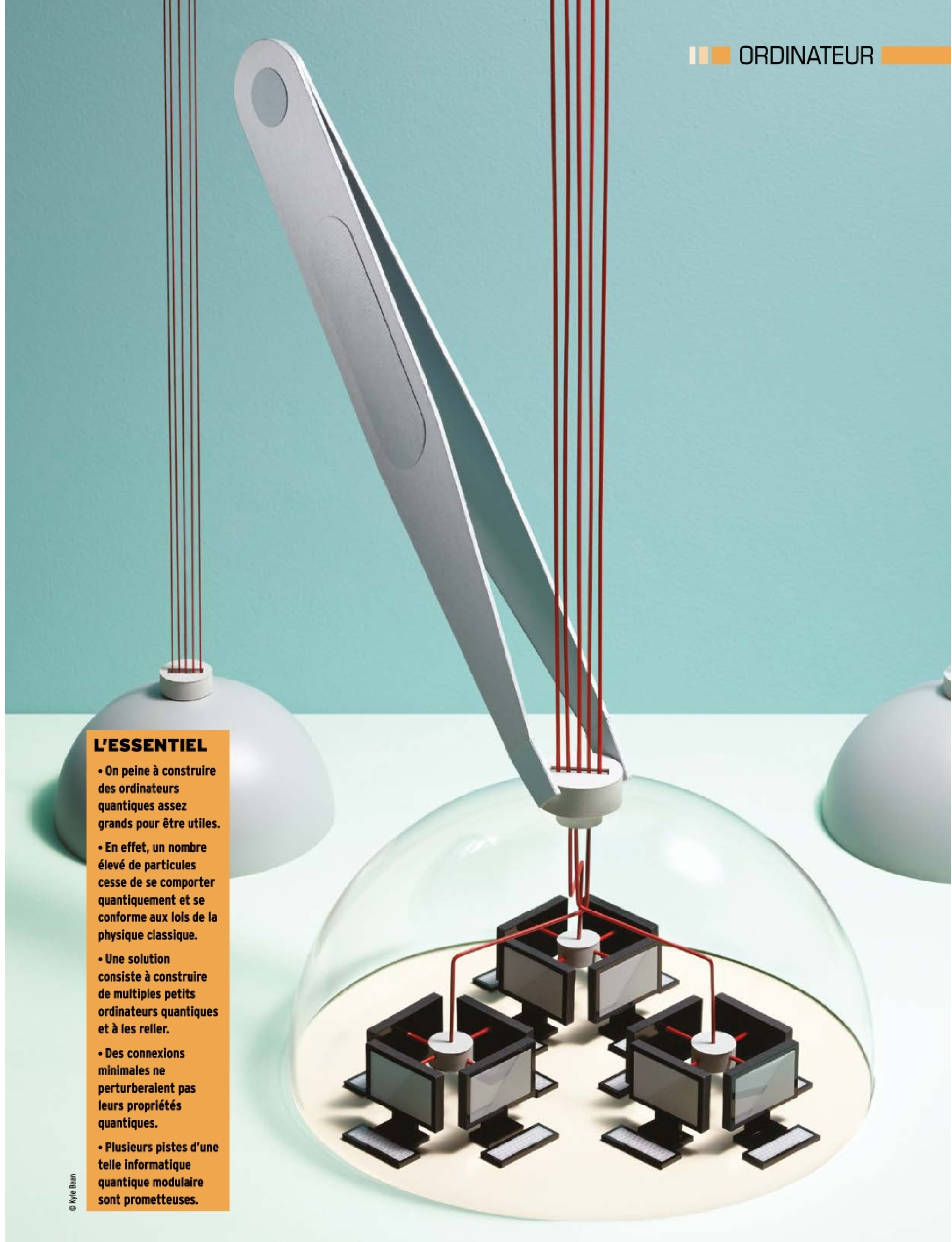
Le problème est que l'on n'est pas encore parvenu à construire une machine quantique à grande échelle qui tienne cette promesse. Le principal défi est qu'un tel ordinateur doit, par définition, fonctionner dans le domaine quantique. Or pour être utile, nous devrons en construire un qui soit assez grand : il aura alors tendance à obéir aux règles classiques du domaine macroscopique.

Pour contourner cet écueil, on peut opter pour une approche modulaire dans laquelle des petites unités quantiques sont connectées de telle façon que leur nature quantique est préservée. Des travaux récents ont sorti cette approche modulaire du domaine théorique et permis des essais réussis à petite échelle. Ces résultats ouvrent la voie à la concrétisation du potentiel unique de machines quantiques.

Des 0 et peut-être des 1

L'idée que le monde quantique pouvait être exploité pour construire des ordinateurs performants a été suggérée à partir des années 1980 par des physiciens et mathématiciens tels que Richard Feynman, de l'institut de technologie de Californie et David Deutsch, de l'université d'Oxford. Cette proposition est restée une pure hypothèse pendant de nombreuses années, jusqu'à ce que Peter Shor, alors aux laboratoires AT&T Bell, montre en 1994 comment un ordinateur quantique pourrait factoriser rapidement des grands nombres, éveillant l'intérêt de la communauté scientifique. Les premiers ordinateurs quantiques basiques ont vu le jour à la fin des années 1990 et au début des années 2000, quand des chercheurs ont construit des systèmes simples composés de quelques *bits* portés par des atomes, des molécules ou des photons.

C'est la nature très particulière des particules quantiques qui confère à l'informatique quantique cet avantage par rapport à son homologue classique. Dans ce dernier cadre, l'unité de base de l'information



© Kyle Bean

L'ESSENTIEL

- On peine à construire des ordinateurs quantiques assez grands pour être utiles.
- En effet, un nombre élevé de particules cesse de se comporter quantiquement et se conforme aux lois de la physique classique.
- Une solution consiste à construire de multiples petits ordinateurs quantiques et à les relier.
- Des connexions minimales ne perturberaient pas leurs propriétés quantiques.
- Plusieurs pistes d'une telle informatique quantique modulaire sont prometteuses.

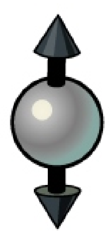
(le bit) prend une valeur définie (0 ou 1). En revanche, l'unité quantique d'information (le qubit) peut exister dans deux états à la fois, ce qui signifie qu'il peut représenter simultanément 0 et 1. Ou il peut correspondre à probablement 0 et peut-être 1. Ou 0 ou 1 avec une égale probabilité. Ou n'importe quelle combinaison pondérée des deux états du système binaires. Si le qubit a une telle puissance, c'est parce que les particules quantiques peuvent exister dans deux endroits ou deux états physiques à la fois : un phénomène nommé superposition.

En plus d'exister simultanément dans deux états, les qubits peuvent être reliés par l'intrication : la capacité pour deux particules séparées dans l'espace de conserver une connexion telle qu'une action effectuée sur l'une se communique à l'autre. Cette propriété donne aux ordinateurs quantiques une capacité de calcul parallèle massif. Quand un ensemble de qubits sont intriqués, une opération simple sur l'un peut affecter tous les autres états des qubits. Même avec seulement quelques qubits, tous ces 0, 1 et autres états de superposition mutuellement dépendants créent un éventail de résultats possibles incroyablement complexe. Là où un ordinateur classique ne peut traiter qu'une possibilité à la fois, un ordinateur quantique pourrait efficacement tester

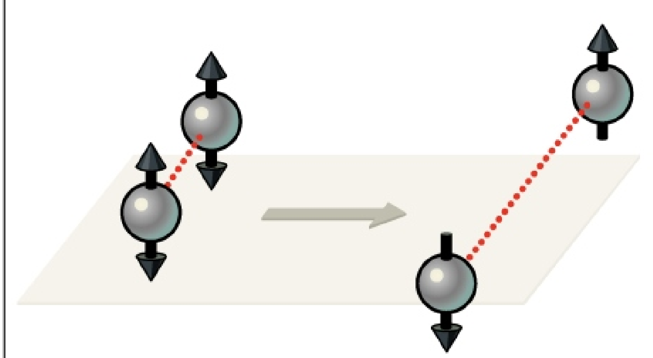
TROIS FAÇONS DE CONSTRUIRE UN ORDINATEUR QUANTIQUE

Les ordinateurs qui exploitent les lois de la mécanique quantique pourraient effectuer des calculs interdits aux ordinateurs classiques. Mais plus un ordinateur est gros, plus il devient difficile de préserver ses propriétés quantiques *(ci-dessous)*. Une solution consiste à construire de nombreux petits ordinateurs quantiques et à les connecter pour en former un plus puissant. Voici trois configurations modulaires *(à droite)* fondées sur trois types différents de bits quantiques, ou qubits.

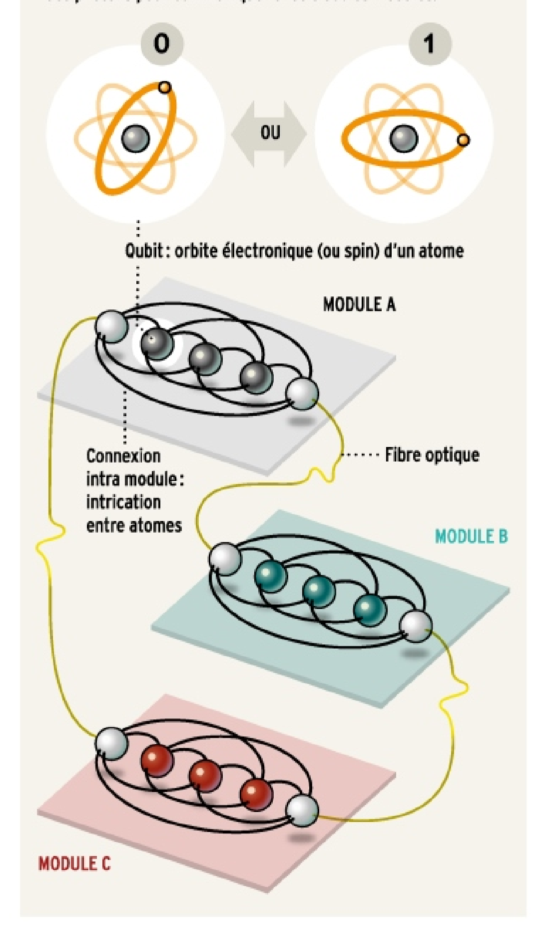
PROPRIÉTÉ QUANTIQUE N° 1 : LA SUPERPOSITION
Les atomes et les particules subatomiques peuvent exister simultanément dans plusieurs états et même plusieurs positions : c'est la superposition d'états. Un objet classique telle une bille ne peut tourner que dans un sens à la fois, les particules peuvent être dans deux états de spin (en « haut » et en « bas ») en même temps, par exemple.



PROPRIÉTÉ QUANTIQUE N° 2 : L'INTRICATION
Cette « action fantomatique à distance », selon Einstein, unit deux particules par un lien instantané : une action effectuée sur l'une affecte la seconde, même quand elles sont très éloignées. Ici, les particules intriquées sont initialement en superposition d'état de spin haut et bas. Quand une mesure extérieure oblige les particules à « choisir » un seul état, les deux particules vont toujours choisir des états coordonnés (ici, l'état de spin haut d'une des particules impose l'état contraire à l'autre).



DES IONS ATOMIQUES
La façon la plus élémentaire de construire un ordinateur quantique modulaire est d'utiliser des atomes simples. Chaque atome peut représenter les valeurs 0 et 1 (ou une superposition des deux) *via* différentes orbites électroniques *(en haut)*. Le schéma ci-dessous représente trois modules (de cinq ions atomiques) reliés de façon à préserver les propriétés quantiques de chacun. Les ions des extrémités *(en blanc)* peuvent émettre des photons pour communiquer avec d'autres modules.



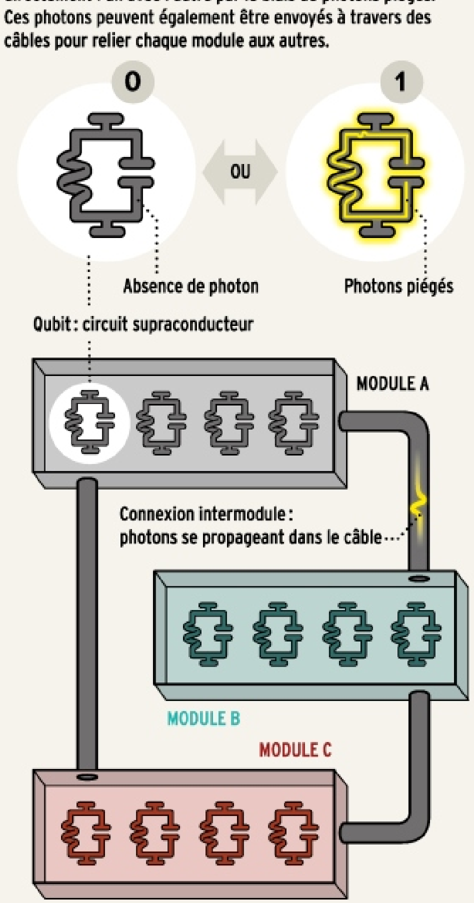
simultanément toutes les solutions possibles à un problème donné. Il suffirait de quelques centaines de qubits pour calculer un tableau de résultats qui dépasse le nombre de particules de l'univers.

Jusqu'à présent, les physiciens ont créé de petits systèmes de calcul quantique comportant quelques qubits. Mais à mesure que nous ajoutons des qubits, il devient de plus en plus difficile de protéger le système du monde extérieur, et toute interférence signe la fin des propriétés qui font toute la supériorité de l'ordinateur quantique. Une superposition quantique de multiples états ne peut avoir lieu qu'isolément. Toute tentative prématurée d'observation ou de mesure d'une particule entraîne automatiquement son effondrement en un état unique, autrement dit le choix d'une possibilité.

À ce stade, les qubits redeviennent les simples bits des ordinateurs classiques. En d'autres termes, les capacités spéciales des objets quantiques ne s'observent typiquement que dans des systèmes très petits, et s'effacent quand ces objets se retrouvent connectés à un ensemble plus large. Les grands systèmes sont généralement trop complexes et insuffisamment isolés pour se comporter quantiquement : nous ne nous attendons pas à trouver une balle en deux endroits différents à la fois.

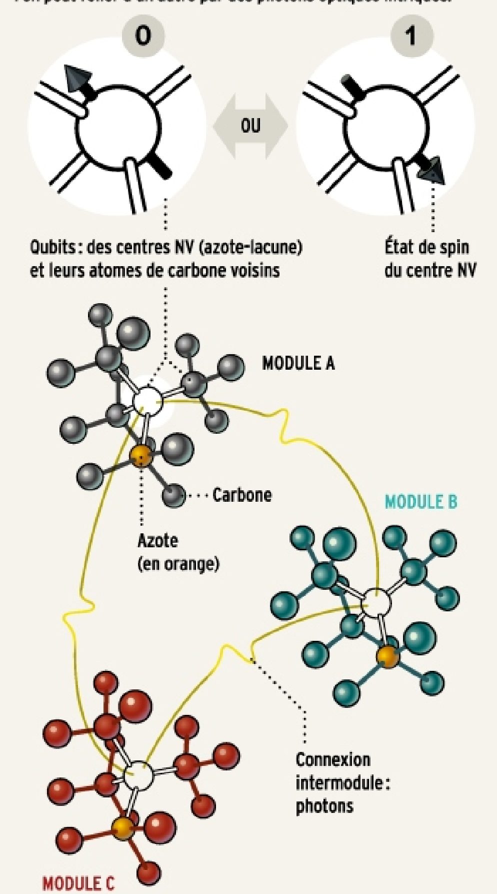
QUBITS SUPRACONDUCTEURS

Les qubits sont des « atomes artificiels » constitués de circuits supraconducteurs. Ce sont des circuits électriques qui peuvent prendre une valeur 0 ou 1 selon l'absence ou la présence d'un photon microonde ou d'un courant électrique oscillant. Au sein de chaque module, les qubits peuvent être intriqués directement l'un avec l'autre par le biais de photons piégés. Ces photons peuvent également être envoyés à travers des câbles pour relier chaque module aux autres.



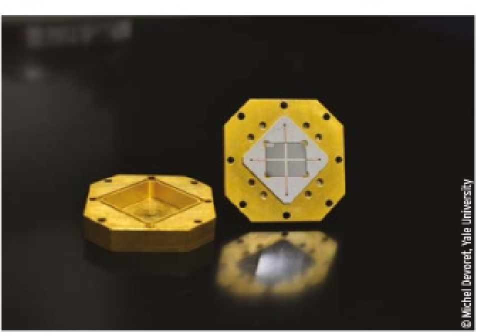
DES SPINS DANS DES SEMI-CONDUCTEURS

Des qubits sont ici des défauts dans un matériau semi-conducteur, tel le réseau d'atomes de carbone d'un diamant. Si un de ces atomes est remplacé par un atome d'azote et qu'un site voisin est vide, on a une impureté nommée centre NV. Ce dernier et les atomes de carbone attenants deviennent tous des qubits, leurs états de spin représentant des 0 et des 1. Chaque grappe d'impuretés du diamant est un module indépendant que l'on peut relier à un autre par des photons optiques intriqués.



Le défi est donc désormais de passer à l'échelle supérieure sans perdre la nature quantique. Une approche par la force brute pour créer un système quantique complexe en se contentant d'additionner et de connecter entre eux des qubits pour former un unique grand réseau est probablement vouée à l'échec quand le système atteint une taille critique. Cette prédiction est étayée par le sort des machines développées par l'entreprise canadienne D-Wave Systems *(voir l'encadré page ci-contre)*, qui sont constituées de centaines ou de milliers de qubits individuels connectés. Ces dispositifs n'ont pas encore fait la preuve d'une intrication quantique à grande échelle ou d'un quelconque gain en vitesse par rapport aux meilleurs ordinateurs classiques.

En revanche, la technique modulaire offre une nouvelle voie prometteuse. Cette solution s'apparente à la stratégie des compagnies aériennes pour gérer la complexité. La carte des lignes desservies, souvent au dos du magazine de bord, donne une idée de ce à quoi un ordinateur quantique à grande échelle pourrait ressembler. Toutes les villes ne sont pas reliées à toutes les autres parce que la logistique et le coût seraient exorbitants. Les compagnies privilégient des *hubs* centraux pour créer des réseaux de connexions indirectes.



UNE BOÎTE EN OR
Un circuit pour mesurer des qubits supraconducteurs est logé dans une boîte plaquée or. Ces mesures peuvent intriquer des qubits en grappes séparées, permettant à des modules de se connecter pour former un ordinateur quantique unifié.

De même, un ordinateur quantique modulaire ne connecterait pas chaque qubit à tous les autres. Il utiliserait quelques qubits comme *hubs* qui connecteraient des modules séparés.

Les réseaux modulaires contribuent à maintenir le nombre d'interactions des qubits à un niveau gérable tout en protégeant chaque module des interférences avec l'extérieur. Ils compensent les sacrifices en termes de connectivité directe en permettant à des milliers, voire des millions, de qubits de collaborer indirectement. Mais à l'inverse des systèmes modulaires classiques, les systèmes modulaires quantiques peuvent nécessiter deux types de liaisons, voire plus, pour obtenir l'intrication nécessaire tout en maintenant les modules isolés. Trois principales stratégies quantiques modulaires, utilisant des types différents de qubits, ont émergé au cours de la dernière décennie. Nous développons indépendamment ces plateformes, et nous pensons qu'elles vont déboucher sur des ordinateurs quantiques plus complexes qui permettront de nouveaux types de traitement de l'information.

Le type le plus naturel de qubit est un atome unique dont les niveaux d'énergie électronique ou nucléaire stockent de l'information quantique. Les qubits atomiques sont fondamentalement faciles à produire en masse parce que de multiples atomes de la même espèce sont pratiquement identiques et qu'il n'est donc pas nécessaire de les fabriquer sur mesure. Des faisceaux laser peuvent refroidir les atomes jusqu'à ce qu'ils soient quasiment au repos. C'est ce que nous faisons tout en suspendant les atomes dans l'espace dans une chambre à vide pour les empêcher d'interagir avec quoi que ce soit d'autre.

Qubits atomiques

Des atomes neutres ou chargés (des ions) peuvent servir de qubits. Pour confiner les qubits obtenus à partir d'atomes neutres, nous utilisons des faisceaux laser focalisés ou un motif de faisceaux laser entrecroisés (on parle de réseau optique). Bien qu'il soit difficile de contrôler et de coupler des atomes neutres au niveau du qubit individuel, il y a de nombreuses pistes prometteuses.

D'autres groupes de recherche utilisent des ions positifs. Les ions interagissent fortement *via* leur répulsion électrique, et peuvent être confinés par des champs électromagnétiques. Nous pouvons refroidir par laser des centaines d'ions piégés pour former un cristal stationnaire d'atomes individuels qui agissent comme des pendules identiques connectés par des ressorts. Des lasers de contrôle supplémentaires peuvent faire bouger les ions de façon à intriquer leurs états de spin (une propriété quantique correspondant au moment angulaire intrinsèque) au travers des vibrations des ions, dans un schéma proposé pour la première fois en 1995 par Ignacio Cirac et Peter Zoller, tous deux à l'université d'Innsbruck.

Ces deux dernières décennies, les chercheurs ont ainsi accompli des progrès phénoménaux dans le contrôle et l'intrication des qubits portés par des ions piégés individuels. Récemment, le groupe de l'un d'entre nous (C. Monroe), celui de David Wineland, de l'institut américain des normes et de la technologie (NIST), à Boulder, dans le Colorado, et celui de Rainer Blatt, de l'université d'Innsbruck, ont fait la démonstration d'opérations d'intrication de haute qualité avec jusqu'à 20 qubits portés par des ions piégés. Récemment, en juin 2016, le record de qubits ioniques intriqués a été porté à 219 par l'équipe de Justin Bohnet, lui aussi du NIST. Il s'agissait d'ions béryllium piégés par des champs électriques et magnétiques en un réseau cristallin.

Les chercheurs ont exploré deux façons de connecter des modules constitués de ces cristaux d'ions intriqués. L'une d'elle consiste à déplacer physiquement quelques-uns des qubits ioniques dans l'espace, d'un module à un autre, en les faisant passer par un labyrinthe complexe

d'électrodes selon une méthode proposée en 2000. On peut s'arranger pour que les ions surfent dans l'espace sur un champ électrique sans perturber leur état de qubit. Quand les ions atterrissent sur le deuxième module, des impulsions laser peuvent les impliquer dans de nouvelles intrications. Les deux modules, contenant chacun par exemple 50 qubits, forment alors un seul et même ensemble pour le calcul, ce qui signifie que 100 qubits travaillent désormais ensemble, même si c'est avec un lien faible. Il n'y a pas de limite théorique au nombre de modules que nous pouvons connecter avec cette technique de « navette d'ions ».

L'un des défis de cette méthode est le contrôle des très complexes pièges à ions, qui sont constitués de centaines voire de milliers d'électrodes par lesquelles s'effectue cette navette et qui doivent être positionnées avec précision. Nous devons manipuler toutes les tensions d'électrodes nécessaires pour obtenir des ions qu'ils surfent à notre convenance dans le labyrinthe. Des efforts remarquables ont été réalisés par les laboratoires Sandia National et Honeywell International pour la fabrication de telles électrodes à piège ionique.

La seconde méthode pour connecter les modules de qubits laisse les atomes en place. Elle utilise des lasers pour déclencher chez les ions l'émission de photons intriqués avec les ions. Ces photons peuvent alors transférer l'intrication entre modules. Ce type d'interface quantique photonique dérive d'idées introduites il y a près de vingt ans par des chercheurs de l'université d'Innsbruck, du Caltech et de l'université Harvard, et sa faisabilité a été mise en évidence il y a dix ans.

La technique de connexion photonique a l'avantage de nous permettre de relier des mémoires qubits qui peuvent être très éloignées. Elle peut également être appliquée à d'autres types de qubits tels que des atomes neutres et des qubits supraconducteurs, nous y reviendrons. De plus, nous pouvons démultiplier la connexion photonique entre modules grâce à des fibres optiques et d'interrupteurs qui permettent de reconfigurer le réseau de qubits intriqués.

Ici, le défi principal est la faible efficacité du lien entre qubit et photon, car il implique de capturer et de guider ces photons. De nombreux essais sont souvent nécessaires avant d'obtenir une connexion réussie. Les meilleures tentatives à ce jour n'ont atteint qu'un taux d'une dizaine de liens intriqués par seconde. Des améliorations de la technologie actuelle devraient augmenter ce taux de plusieurs ordres de grandeur.

Les atomes ont beau être les qubits « naturels », leur contrôle et leur utilisation à grande échelle posent plusieurs défis technologiques. Une stratégie alternative consiste à concevoir des « atomes artificiels » à l'aide de matériaux supraconducteurs. Ces dispositifs contiennent de nombreux atomes, mais peuvent néanmoins avoir un comportement de simples qubits que l'on peut contrôler. Dans ces qubits, les états 0 ou 1 correspondent à la présence ou à l'absence d'un unique photon microonde, ou bien au sens (celui des aiguilles d'une montre ou l'inverse) de circulation d'un courant à l'intérieur d'un circuit.

LES PREMIERS ORDINATEURS QUANTIQUES

Le 4 mai 2016, IBM annonçait la mise à disposition du public, *via* internet... d'un ordinateur quantique ! Rien de moins. Ainsi, le rêve de tous les physiciens se serait réalisé ? Pas tout à fait. Il s'agit en fait d'une chaîne de seulement cinq qubits (ici des supraconducteurs) , soit une faible puissance. Pour rivaliser avec les supercalculateurs actuels, il en faudrait dix fois plus. Cependant, on peut se familiariser avec le concept et même résoudre des problèmes mathématiques simples.

D'autres acteurs sont lancés dans la course. Ainsi, le 21 juillet 2016, une équipe de *Google*, en collaboration avec les universités Harvard, Tufts, de Berkeley, de Santa Barbara, aux États-Unis, ainsi que le University College, à Londres, ont simulé la surface d'énergie potentielle d'une molécule de dihydrogène à l'aide d'un dispositif fondé sur des qubits, la surface d'énergie potentielle rendant compte de toutes les interactions possibles des atomes (ici, les deux atomes d'hydrogène). Les chimistes attendent impatiemment leur tour, sachant que le même travail, par exemple pour du propane (C_3H_8, soit 11 atomes) requiert 10 jours de calcul au plus puissant des ordinateurs classiques. Le temps nécessaire croit exponentiellement avec le nombre d'atomes.

Pour ce faire, les chercheurs ont utilisé une approche nommée VQE (pour *Variational quantum eigensolver*) qui est une sorte d'analogue quantique à un réseau de neurones où les qubits représentent les fonctions d'ondes de la molécule. Résultat : la simulation de la molécule est rapide et correspond presque parfaitement à son comportement observé expérimentalement.

Google n'en est pas à son premier coup d'éclat avec les ordinateurs quantiques. Avec la Nasa, l'entreprise développe le supercalculateur D-Wave 2X, conçu par la société canadienne D-Wave, acquise par le géant de l'Internet en 2013. En décembre 2015, les équipes dédiées ont annoncé avoir résolu un problème d'optimisation impliquant 945 variables binaires 100 millions de fois plus vite qu'une machine classique : cela correspond à 1 seconde contre 10 000 ans !

Cette prouesse a été permise par une puce constituée de 1 097 circuits supraconducteurs (les qubits). Cependant, ils n'exécutent que des algorithmes (dits de recuit simulé quantique) et non des calculs avec des portes logiques. La machine n'est donc pas un ordinateur, mais un calculateur. De fait, D-Wave 2X ne résout que des problèmes d'optimisation. En outre, des spécialistes contestent le fonctionnement réellement quantique de la machine. En fin de compte, les progrès sont là, mais l'ordinateur quantique n'est pas près de trôner sur votre bureau.

Qubits supraconducteurs

De tels circuits quantiques ont plusieurs avantages. Nous pouvons ajuster leurs propriétés à la conception et les produire en masse avec les techniques de fabrication des circuits intégrés conventionnels. Remarquablement, quand ils fonctionnent à des températures proches du zéro absolu, la superposition d'états dure assez longtemps ; ce sont des qubits robustes. Depuis quinze ans, les durées de vie de ces systèmes ont été multipliées par plus de un million.

articles

- **J. BOHNET *et al.*, Quantum spin dynamics and entanglement generation with hundreds of trapped ions, 2016. arxiv.org/abs/1512.03756**
- **P. O'MALLEY *et al.*, Scalable quantum simulation of molecular energies, *Physical Review X*, vol. 6, 031007, 2016.**
- **V. DENCHEV *et al.*, What is the computational value of finite range tunneling ?, 2016. arxiv.org/abs/1512.02206**

internet

- **L'ordinateur quantique d'IBM : http://bit.ly/IBM-Q**

Dans la décennie écoulée, les travaux sur ces circuits quantiques supraconducteurs ont fait des progrès rapides, démontrant qu'ils sont dotés de beaucoup des caractéristiques nécessaires pour un ordinateur quantique. Les chercheurs de nombreux laboratoires universitaires, ainsi que des acteurs industriels tels que Google et IBM, savent maintenant manipuler et intriquer plusieurs qubits supraconducteurs.

Avec des techniques d'« électrodynamique quantique de circuit » introduites par l'un de nous (R. Schoelkopf) avec ses collègues Michel Devoret et Steve Girvin, de l'université Yale, nous sommes également capables d'intriquer de multiples qubits sur de grandes distances grâce à des lignes de transmission supraconductrices.

Les dispositifs supraconducteurs se prêtent naturellement à une architecture modulaire. Nous pouvons établir des connexions entre modules au sein d'un gros dispositif cryogénique par l'intermédiaire de fils supraconducteurs et de dispositifs de mesure tout en réduisant les interférences entre les modules en les protégeant les uns des autres. Pour générer l'intrication entre modules, des chercheurs ont développé des dispositifs supraconducteurs spéciaux pour la mesure quantique.

L'approche modulaire avec des qubits supraconducteurs a plusieurs caractéristiques attrayantes. Au lieu de construire et de tester un circuit gigantesque, nous avons seulement besoin de produire en masse et calibrer les modules plus modestes, et de construire la complexité module par module. Nous pouvons éliminer ou sauter les modules défectueux et refaire les connexions entre modules pour créer des architectures différentes.

Des travaux sont également en cours pour développer des transducteurs quantiques qui transforment un signal microonde en un autre de plus petite longueur d'onde afin de pouvoir connecter des modules éloignés par fibre optique. De la sorte, on créerait des réseaux quantiques à longue portée et même un ordinateur quantique distribué.

Des qubits dans des diamants

Enfin, un troisième type de qubit code l'information dans des états de spin au sein de matériaux semi-conducteurs. Plusieurs modèles ont été imaginés, mais une méthode prometteuse, explorée par l'un d'entre nous (M. Lukin), ainsi que par d'autres groupes, utilise des défauts cristallins pour générer des qubits. Et les cristaux en question sont des diamants !

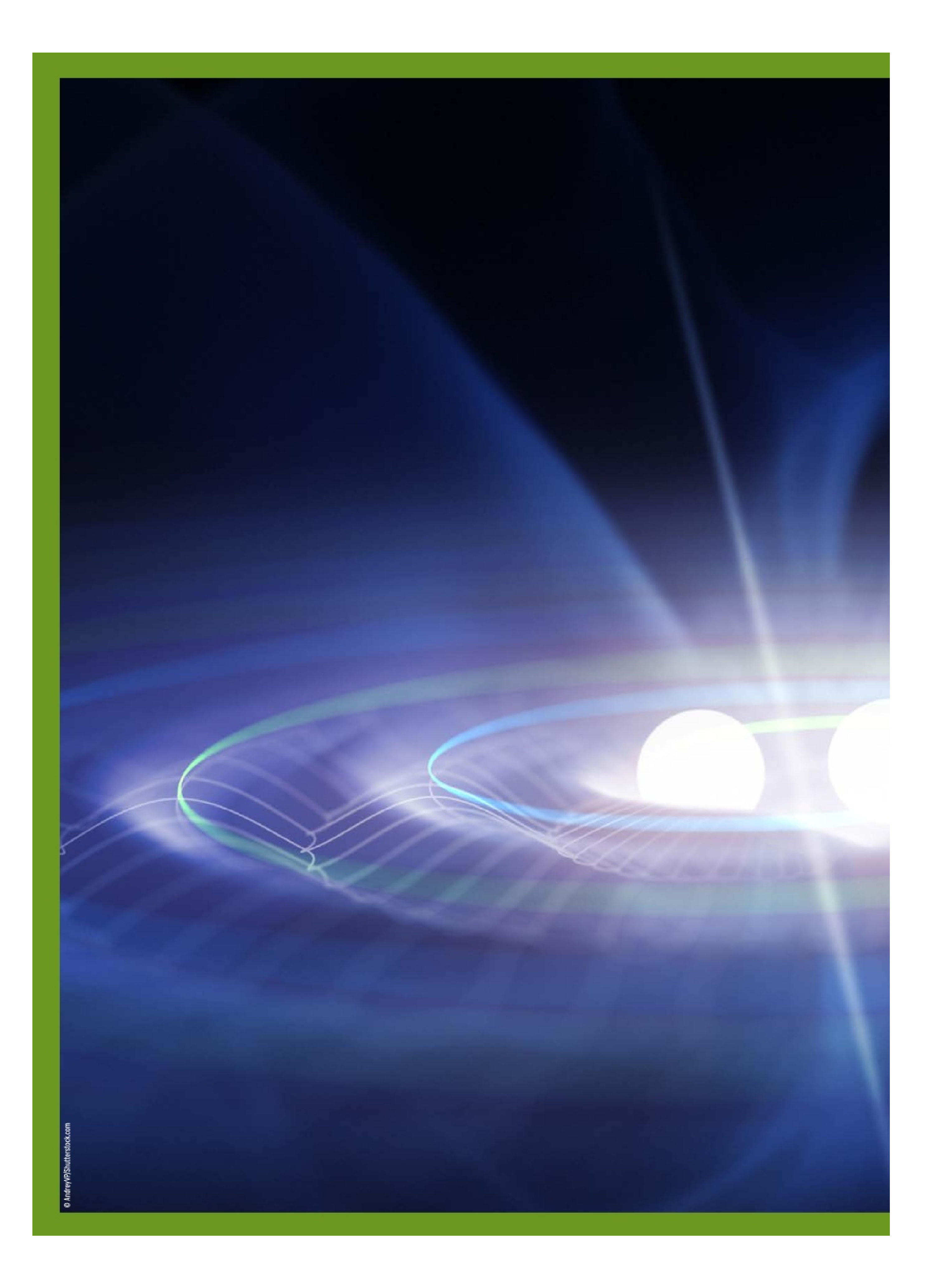
Dans l'un de ces systèmes, on utilise le réseau d'atomes de carbone d'un diamant dans lequel un unique atome est remplacé par de l'azote tandis qu'un site voisin est vide : cette impureté est un centre NV (pour *nitrogen-vacancy*, soit « Azote-lacune »). Des impulsions électromagnétiques peuvent contrôler le spin électronique de cette impureté. Dans une méthode mise au point par Mikhail Lukin et ses collègues, le centre NV réagit aux spins nucléaires de ses plus proches voisins carbone, créant une grappe de qubits formés par les interactions magnétiques des particules. Toutefois, une impureté NV n'a qu'un nombre limité de proches voisins, limitant le nombre total de qubits par module à moins d'une douzaine.

Pour passer à l'échelle supérieure, on doit connecter de multiples modules NV. Quand les qubits sont dans des réseaux cristallins séparés, nous pouvons les relier en forçant chaque qubit à émettre un photon, puis en intriquant ces photons. Mais si de multiples impuretés NV se trouvent au sein d'un unique réseau de diamant, nous pouvons les connecter en utilisant des vibrations quantiques nommées phonons, qui peuvent transporter de l'information quantique entre les impuretés.

Remarquablement, bien que la manipulation d'information encodée dans ces centres NV soit délicate, elle s'effectue souvent à température ambiante. Des techniques pour observer un à un les centres NV, développées au cours de la dernière décennie par Jörg Wrachtrup et Fedor Jelezko, respectivement des universités de Stuttgart et d'Ulm, en Allemagne, permettent de travailler avec des qubits de spin électronique individuels. Une équipe dirigée par Davis Awschalom, de l'université de Chicago, aux États-Unis, est parvenue à manipuler ces qubits à l'échelle de la nanoseconde, ce qui est comparable à la vitesse des processeurs classiques modernes.

Récemment, Ronald Hanson et ses collègues de l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas, ont intriqué des qubits portés par des impuretés NV uniques et séparés de plus de un kilomètre grâce à des photons intriqués (comme dans la méthode photonique décrite précédemment). Aujourd'hui, cette méthode de connexion quantique n'est pas très efficace, mais de nouvelles techniques qui promettent de l'améliorer considérablement en utilisant des dispositifs optiques aux échelles nanométriques ont récemment émergé à Harvard et à l'institut de technologie du Massachusetts. Et parce que nous avons déjà les moyens de créer plusieurs qubits autour d'un unique défaut du réseau cristallin et de les stocker pendant plus d'une seconde, les centres NV affichent un grand potentiel pour une architecture d'informatique quantique modulaire évolutive contrôlable.

Conséquence de plus de vingt années de progrès, les physiciens ont testé expérimentalement à petite échelle toutes ces approches d'informatique quantique modulaire. Le défi est désormais d'étendre ces techniques à des ensembles plus grands de qubits et de modules, et de commencer à les utiliser pour des applications intéressantes. Cet objectif est en vue. L'heure est venue où l'on peut enfin cesser de s'interroger sur la faisabilité des ordinateurs quantiques, et commencer à en fabriquer !





À L'ÉCHELLE DE L'UNIVERS

On cantonne souvent la physique quantique à l'explication du monde microscopique, celui des atomes, des particules, des photons… Pourtant, elle est indispensable pour comprendre l'histoire de l'Univers, la nature de l'espace-temps et même pour détecter les ondes gravitationnelles, le nouveau mode d'exploration de l'Univers. Il reste néanmoins à la réconcilier avec l'autre pilier de la physique, la relativité générale…

LA DÉTECTION D'ONDES gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs est le plus important résultat de la physique en 2016. C'est aussi un triomphe de la physique quantique qui a permis cette prouesse.

L'Univers est-il **pointilliste** ?

De nombreux physiciens théoriciens soutiennent une vision pointilliste du monde aux plus petites échelles : l'espace-temps serait discret, c'est-à-dire quantique. Toutefois, je pense qu'un examen des lois de la nature suggère un monde physique continu. Quelles sont les implications pour la physique ?

David TONG
est professeur de physique théorique à l'université de Cambridge, en Grande-Bretagne.

Dans le film *Matrix*, le héros Néo découvre que le monde dans lequel il vit n'est qu'un univers virtuel où tout est contrôlé par une machine et ses programmes informatiques. Pure fiction ? Pas tout à fait... Aujourd'hui, de nombreux physiciens en sont arrivés à se représenter le monde naturel comme un immense ordinateur décrit par des bits d'information, et les lois de la physique comme un algorithme. Comment sont-ils parvenus à cette vision ?

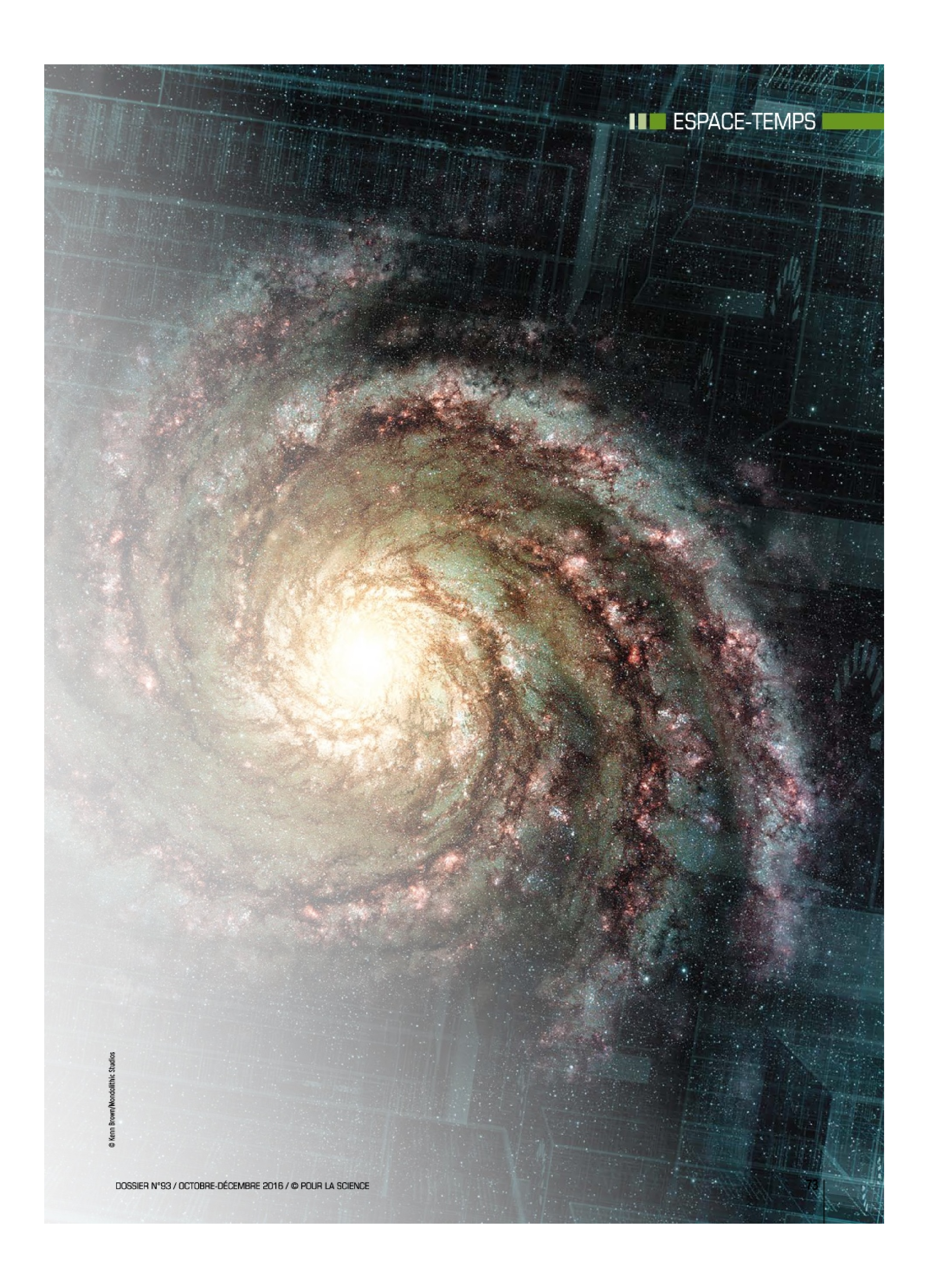
À la fin du XIXe siècle, le mathématicien allemand Leopold Kronecker déclarait : « Dieu a créé les nombres entiers, tout le reste est l'œuvre de l'homme. » Il pensait que les nombres entiers jouent un rôle fondamental en mathématiques. Pour les physiciens, cette citation fait écho à une conception qui s'est imposée ces dernières décennies, à savoir que la nature serait essentiellement discrète et non continue, que les éléments de base de la matière et de l'espace-temps peuvent être comptés un par un. Cette idée, déjà proposée par les atomistes de la Grèce ancienne, nous parle davantage encore à l'ère numérique. Vivons-nous alors vraiment dans un ordinateur quantique gouverné par un algorithme ? Notre monde est-il pointilliste ? Ce n'est pas mon avis.

En dehors de la *Matrix*

Ce n'est pas dans l'air du temps, et pourtant, je suis loin d'être le seul scientifique à penser que la réalité est au fond continue plutôt que discrète. Selon moi, le monde est un continuum : zoomez tant que vous voudrez, vous ne trouverez pas d'éléments de base irréductibles. Les quantités physiques ne sont pas des nombres entiers, mais des nombres réels, des nombres continus avec une infinité de chiffres après la virgule. Les fans de *Matrix* seront déçus : les lois actuelles de la physique présentent certaines

L'ESSENTIEL

- On se représente souvent la mécanique quantique comme discrète par nature.
- Toutefois, ses équations sont formulées en termes de grandeurs continues.
- Les valeurs discrètes, ou quanta, émergent au gré de la façon dont le système est contraint.
- Selon les partisans d'un monde discret, les grandeurs physiques sont discrètes, et donnent l'illusion d'un continuum à grande échelle.
- Mais l'idée d'un monde discret semble incompatible avec la chiralité, une asymétrie gauche-droite de certaines particules.



© Kenn Brown/Mondolithic Studios

caractéristiques que personne ne sait simuler sur ordinateur, et qui refusent donc de se plier à une discrétisation, quelle que soit sa mémoire. Il est essentiel d'intégrer cet aspect pour développer une théorie physique complètement unifiée.

Le débat entre le continu et le discret est l'un des plus anciens de la physique. Tandis que les atomistes concevaient la réalité comme discrète, d'autres philosophes grecs (Aristote par exemple) se la représentaient comme un continuum. À l'époque d'Isaac Newton, aux XVIIe et XVIIIe siècles, les philosophes de la nature étaient partagés entre théories corpusculaires (discrètes) et théories ondulatoires (continues). À l'époque de Kronecker, les avocats de l'atomisme, tels que John Dalton, James Clerk Maxwell et Ludwig Boltzmann, savaient dériver, sur des bases atomistiques, les principes de la chimie et de la thermodynamique. Mais de nombreux scientifiques restaient sceptiques.

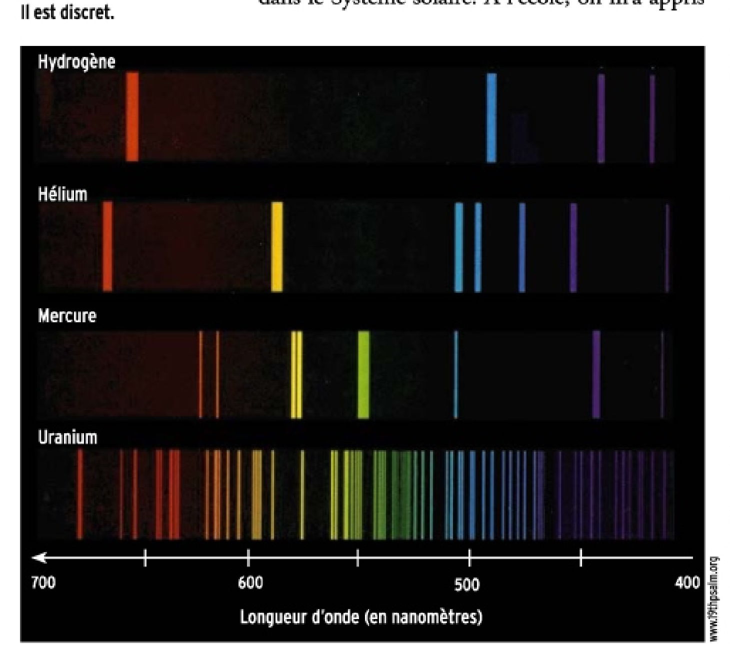
Wilhelm Ostwald, lauréat du prix Nobel de chimie en 1909, faisait remarquer que les principes de la thermodynamique ne se réfèrent qu'à des quantités continues telles que l'énergie. De même, la théorie électromagnétique décrit les champs électriques et magnétiques comme des grandeurs continues. En 1882, Max Planck, qui sera un précurseur de la physique quantique, concluait un important article par ces mots : « Malgré le succès actuel de la théorie atomique, elle devra à terme être abandonnée au profit de l'hypothèse d'une matière continue. »

L'un des arguments les plus puissants des partisans du continu est l'apparence arbitraire du discret. À titre d'exemple, considérons le nombre de planètes dans le Système solaire. À l'école, on m'a appris qu'il y en avait neuf. En 2006, les astronomes ont officiellement déchu Pluton de son rang de planète, et il n'en reste plus que huit. Dans le même temps, ils ont introduit une liste de « planètes naines ». Du coup, si vous incluez ces dernières, leur nombre s'élève alors à treize.

En résumé, la seule réponse honnête à la question du nombre de planètes est que cela dépend de la façon dont vous comptez. La ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune, contient des objets dont la taille varie entre quelques micromètres et quelques milliers de kilomètres. Vous ne pouvez compter le nombre de planètes que si vous faites une distinction arbitraire entre ce qui est une planète, ce qui est une planète naine, et ce qui est simplement un gros morceau de roche ou de glace.

La mécanique quantique a transformé le débat discret-continu (le terme *quantum* a été introduit pour désigner une quantité minimale bien définie, d'énergie en l'occurrence). En effet, si la définition d'une planète peut être arbitraire, ce n'est pas le cas de celle d'un atome ou d'une particule élémentaire. Les entiers qui numérotent les éléments chimiques sur le tableau de Mendeleïev (qui correspondent aux nombres de protons des atomes en question) sont objectifs. Quels que soient les développements que la physique nous réserve, nous n'observerons jamais d'élément à $\sqrt{500}$ protons, situé entre le titane et le vanadium. Les entiers en physique atomique ont vocation à rester.

LE SPECTRE D'ÉMISSION d'un atome est constitué de longueurs d'onde particulières que l'on peut étiqueter à l'aide de nombres entiers. Il est discret.



Des entiers nés d'une équation continue

Un autre exemple est fourni par la spectroscopie, l'étude de la lumière émise ou absorbée par la matière. Un atome d'un type donné ne peut émettre que de la lumière de longueurs d'onde (ou couleurs) particulières, ce qui constitue une empreinte caractéristique de chaque élément. Contrairement aux empreintes digitales humaines, les spectres atomiques obéissent à des règles mathématiques précises, et ces règles mettent en jeu des entiers. Les premières tentatives pour comprendre la théorie quantique, notamment par le physicien danois Niels Bohr, plaçaient l'aspect discret au cœur de l'édifice.

Mais l'interprétation de Bohr n'a pas eu le dernier mot. En 1925, l'Autrichien Erwin Schrödinger a développé une approche alternative de la théorie quantique, fondée sur la notion d'ondes. L'équation qu'il a formulée pour décrire l'évolution de ces ondes au cours du temps ne contient que des grandeurs continues, et pas d'entiers. Cependant, quand on résout l'équation de Schrödinger pour un système donné, on assiste à un tour de magie mathématique. Prenons l'atome d'hydrogène : les électrons sont en orbite autour du noyau à des niveaux d'énergie bien particuliers. Cela se traduit par un spectre d'émission spécifique

de l'atome *(voir la figure page ci-contre)*. L'atome est analogue à un orgue, qui produit une série discrète de notes alors que le mouvement de l'air dans les tuyaux est continu. Au moins en ce qui concerne l'atome, la leçon est claire : Dieu n'a pas fait les nombres entiers ; il a fait les nombres réels, et le reste est le fait de l'équation de Schrödinger.

En d'autres termes, les entiers ne sont pas des hypothèses de la théorie, comme le pensait Bohr, mais des conséquences. Les entiers sont un exemple de ce que les physiciens nomment une quantité émergente. Dans cette perspective, le terme de mécanique « quantique » est impropre : la théorie ne contient pas de quanta (c'est-à-dire des quantités discrètes) dans sa formulation. Dans des systèmes tels que l'atome d'hydrogène, les processus décrits par la théorie engendrent du discret à partir de la continuité sous-jacente.

Peut-être plus surprenant encore, l'existence d'atomes, ou de toute particule élémentaire, n'est pas une hypothèse de nos théories. Les physiciens enseignent au quotidien que les briques de la nature sont des particules discrètes telles que l'électron ou le quark. C'est faux. Les éléments fondamentaux de nos théories ne sont pas des particules, mais des champs : des objets continus, semblables à des fluides, qui occupent tout l'espace. Les champs électriques et magnétiques en sont des exemples familiers, mais il existe aussi un champ électronique pour l'électron, un champ pour chaque type de quark, un champ de Higgs, et ainsi de suite. Les objets que nous qualifions de particules élémentaires ne sont pas fondamentaux, ce sont en fait des modes d'oscillation de champs continus.

Un sceptique pourrait rétorquer que des entiers sont bien inscrits dans les lois de la physique. Par

Notre Univers est-il un hologramme ?

Le monde est-il flou ? Ce n'est pas une métaphore. Pour Craig Hogan, physicien des particules à l'université de Chicago et directeur du Centre d'astroparticules du Fermilab, dans l'Illinois, si nous parvenions à observer les plus petites subdivisions de l'espace et du temps, nous découvririons un Univers en perpétuelle effervescence, un incessant bourdonnement de fluctuations. Ce bruit serait la marque d'un espace discontinu qui, au lieu d'être une toile de fond bien lisse à la danse des particules, serait au contraire constitué de petits morceaux irréductibles : un Univers discret..

Hogan a entrepris de tester si la nature discrète de l'espace est une réalité. Il a ainsi conçu une expérience pour explorer l'agitation intrinsèque de l'espace aux échelles les plus fondamentales. Son dispositif, nommé holomètre, met en jeu un interféromètre extrêmement précis (avec des lasers) installé sur le campus du Fermilab. Pour l'essentiel, il s'agit d'une version moderne de la célèbre expérience de Michelson et Morley, qui a détruit la vision qu'on avait de l'espace et du temps à la fin du XIXe siècle. Sauf qu'ici, en utilisant deux interféromètres placés l'un à côté de l'autre, l'idée est de sonder l'échelle de Planck, la plus petite échelle de l'Univers.

Depuis quelques dizaines d'années, un débat sur la nature des trous noirs a fait émerger une compréhension nouvelle de l'échelle de Planck. L'essence de l'Univers serait l'information, dont les bits constitutifs seraient encodés dans la trame de l'espace-temps à l'échelle de Planck. Pour surmonter un paradoxe (celui de la disparition de l'information dans un trou noir), les physiciens ont développé une théorie, le principe holographique selon lequel l'information d'un objet tombant dans un trou noir est, d'une façon ou d'une autre, sauvegardée à la surface du trou noir (plus précisément à l'horizon des événements).

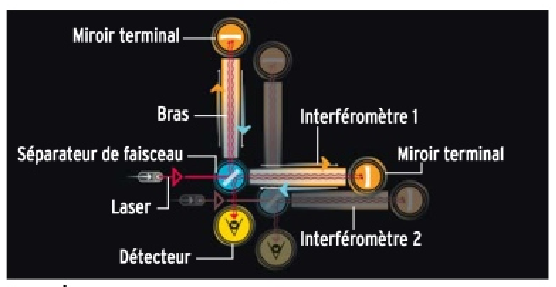
Étendu à l'Univers entier, le principe holographique stipule que toute l'information sur l'univers tridimensionnel qui nous entoure serait encodée sur des surfaces bidimensionnelles qui restent à déterminer : nous vivrions dans un hologramme ! Le principe holographique laisse entrevoir une connexion profonde entre l'information, l'espace-temps, la matière et la gravité. Il pourrait révéler la direction à suivre pour développer la théorie quantique complète de la gravitation, qui engloberait la relativité et la physique quantique.

Hogan propose de déterminer si, au niveau fondamental, l'espace se décompose en unités d'information. Dans la plupart des interprétations, l'espace-temps qui émerge de la description holographique de l'Univers est intrinsèquement quantique, c'est-à-dire qu'il est discret et fluctuant. Plus précisément, dans cet espace-temps quantique émergent, la position d'un objet n'est pas précisément définie. Ainsi, à l'échelle de Planck, l'espace-temps est agité d'un sautillement permanent, la position précise d'un objet fluctuant sans cesse. Comment le mesurer ?

Hogan a calculé que le signal résultant de cette incertitude sur l'espace-temps, ou bruit holographique, doit avoir une amplitude de l'ordre de l'attomètre (10^{-18} mètre) sur une échelle de temps de quelques dizaines de microsecondes. C'est très petit, mais en principe détectable par les interféromètres les plus précis. C'est l'ambition de l'holomètre, dont le principe est aussi mis en œuvre dans le LIGO pour détecter les ondes gravitationnelles. L'instrument a observé en direct le 14 septembre 2015 des ondes gravitationnelles (l'annonce a été faite le 11 février 2016) issues de la collision de deux trous noirs.

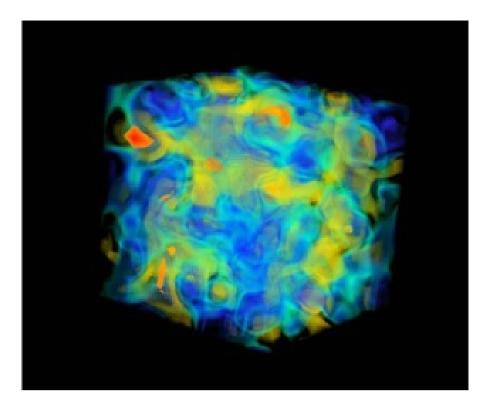
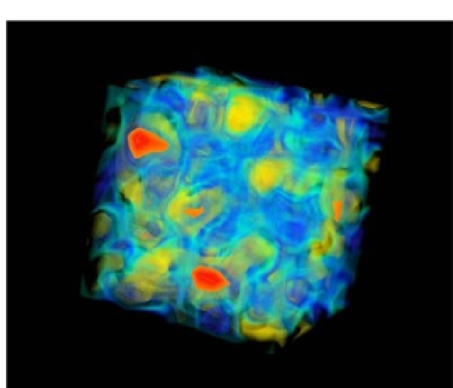
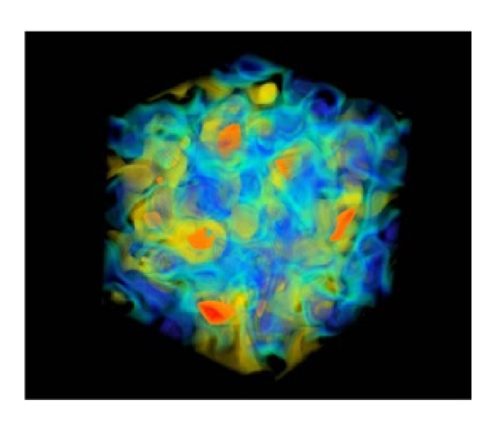
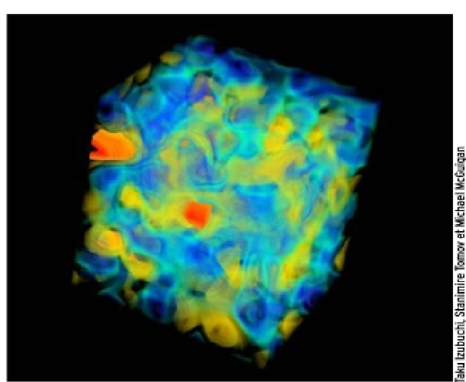
Le bruit détecté par l'holomètre peut prendre deux formes, une sorte de tressautement ou bien une rotation. Après une année de collecte de données, le premier type de mouvement peut-être éliminé : il n'y a pas de gesticulations quantiques. Peut-on en conclure que l'Univers n'est pas un hologramme ? Hogan n'est pas de cet avis. D'abord, l'absence de détection des sautillements est un résultat en soi qui fait progresser la physique. Ensuite, on peut encore espérer détecter les rotations des quanta d'espace-temps. La prochaine étape consistera donc à reconfigurer l'appareil de façon à l'adapter à ce type de signal. On n'a pas encore abandonné l'idée que notre Univers est un hologramme. Est-ce rassurant ?

Michael Moyer est rédacteur à *Scientific American*.



L'HOLOMÈTRE est conçu pour repérer un signal qui trahirait la nature discrète de l'espace-temps. Il est constitué de deux interféromètres, qui détectent de minuscules variations de la distance parcourue par des faisceaux laser.

© Leandro Castelao

Taku Izubuchi, Stanimire Tomov et Michael McGuigan

UN PROBLÈME DE RÉSEAU. La chromodynamique quantique, qui décrit les quarks, les gluons et l'interaction forte à laquelle ces particules sont soumises, peut être simulée sur un réseau, c'est-à-dire un ensemble constitué d'un nombre fini de points *(ici, on visualise une grandeur nommée charge topologique à quatre instants différents)*. Cependant, une telle simulation sur réseau semble impossible pour certains types de particules intervenant dans le modèle standard, qui décrit aussi l'interaction électromagnétique et l'interaction faible.

exemple, ces lois décrivent trois types de neutrinos, six types de quarks, et ainsi de suite. Des entiers, partout des entiers. Vraiment ? Tous ces exemples dénombrent en fait les espèces de particules du modèle standard de la physique des particules, des quantités pour lesquelles il est difficile d'obtenir une précision mathématique quand les particules interagissent. En effet, ces dernières se transforment : un neutron peut se scinder en un proton, un électron et un neutrino. Devrions-nous alors considérer que nous avons affaire à une, trois ou quatre particules ? L'affirmation de l'existence de trois sortes de neutrinos, six sortes de quarks, etc., est un artifice dû à la non-prise en compte des interactions des particules.

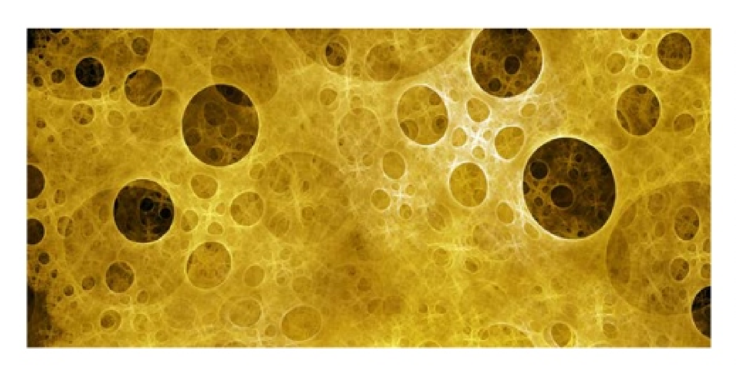
Un nombre incertain de dimensions ?

Un autre exemple d'entier intervenant dans les lois de la physique est le nombre de dimensions de l'espace. On en observe trois. En sommes-nous certains ? Le mathématicien franco-américain Benoît Mandelbrot a fait remarquer que le nombre de dimensions n'est pas nécessairement un entier. La côte ouest de la Bretagne, par exemple, a une dimension (dite fractale) d'environ 1,4. De plus, dans de nombreuses propositions de théories unifiées, telles que la théorie des cordes, il y a ambiguïté sur le nombre de dimensions de l'espace : des dimensions spatiales peuvent émerger ou se dissoudre.

En fin de compte, je me hasarde à dire qu'il pourrait n'y avoir qu'un seul entier véritable dans toute la physique : en effet, les lois de la physique ne prennent en compte qu'une seule dimension pour le temps. S'il n'y avait pas précisément une dimension temporelle, il semble que la physique serait incohérente.

Même si nos théories actuelles supposent que la réalité est continue, beaucoup de mes collègues physiciens pensent malgré tout qu'une réalité discrète est sous-jacente. Ils mettent en avant des exemples montrant comment la continuité peut émerger de la quantification. Aux échelles macroscopiques de notre expérience quotidienne, l'eau contenue dans un verre semble lisse et continue. C'est seulement quand on l'examine de beaucoup plus près que l'on discerne les constituants atomiques. Un mécanisme de ce type pourrait-il être à la base de la physique ? Si nous regardions à un niveau plus profond, les champs quantiques, voire l'espace-temps lui-même, révéleraient-ils eux aussi une structure sous-jacente discrète ?

« Je me hasarde à dire qu'il pourrait n'y avoir qu'un seul entier véritable dans toute la physique : 1. S'il n'y avait pas précisément une seule dimension temporelle, la physique serait incohérente. »



UNE ÉPONGE FRACTALE peut être caractérisée par une dimension comprise entre deux et trois : le nombre de dimensions n'est pas forcément un entier.

Nous ignorons la réponse, mais quarante années de tentatives de simulation du modèle standard sur ordinateur livrent un indice *(voir la figure page ci-contre)*. Pour réaliser une telle simulation, il faut d'abord prendre les équations, exprimées en termes de grandeurs continues, et en trouver une formulation discrète, compatible avec les bits d'information que les ordinateurs manipulent. Or en dépit de plusieurs décennies d'efforts, personne n'y est encore parvenu. Et cela constitue l'un des problèmes ouverts les plus importants de la physique théorique, bien que ce soit rarement évoqué.

Problématiques fermions

Les physiciens ont développé une version discrétisée de la théorie quantique des champs, la « théorie des champs sur réseau », où l'espace-temps continu est remplacé par un réseau de points. Les ordinateurs évaluent les champs en ces points pour approximer un champ continu. Mais cette technique a des limites. La difficulté vient des électrons, des quarks et des autres particules de matière, les fermions. Ces derniers se distinguent des autres particules – les bosons –, en ce sens que, si l'on fait tourner un fermion de 360 degrés, on ne retrouve pas l'objet de départ; pour cela, il faut le faire tourner de 720 degrés : ils ont un spin non entier ! Les fermions (ou plutôt leurs champs) résistent à la mise sur réseau. Dans les années 1980, le Danois Holger Bech Nielsen et le Japonais Masao Ninomiya ont prouvé un théorème selon lequel il est impossible de discrétiser le type le plus simple de fermion.

Cependant, la validité de tels théorèmes n'est pas supérieure à celle de leurs hypothèses. Dans les années 1990, des théoriciens, en particulier David Kaplan, maintenant à l'université de Washington, et Herbert Neuberger, de l'université Rutgers, ont introduit des méthodes astucieuses pour mettre des fermions sur réseau. Les théories quantiques des champs se présentent sous diverses formes, chacune avec différents types possibles de fermions, et l'on parvient maintenant à les formuler presque toutes sur réseau. Il ne reste qu'une classe de théories des champs que l'on ne sache toujours pas mettre sur réseau. Et hélas, le modèle standard en fait partie : nous savons manipuler toutes sortes de fermions hypothétiques, mais pas ceux qui existent en réalité.

Les fermions du modèle standard ont une propriété très particulière. Ceux qui tournent sur eux-mêmes dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont sensibles à l'interaction faible, mais pas ceux qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre. La théorie est dite chirale. Or une théorie chirale est délicate : des effets subtils, qualifiés d'anomalies, menacent en permanence de la rendre incohérente. Ces théories ont jusqu'à présent résisté à toutes les tentatives de simulation sur ordinateur.

Mais la chiralité n'est pas un défaut du modèle standard susceptible de disparaître dans une théorie plus profonde ; elle en est une caractéristique centrale. À première vue, le modèle standard, fondé sur trois forces liées les unes aux autres, apparaît comme une construction arbitraire. C'est seulement lorsqu'on réfléchit aux fermions chiraux que sa véritable beauté émerge. C'est un puzzle parfait, dont les trois composantes sont emboîtées de la seule manière possible. Dans le modèle standard, c'est la nature chirale de ses fermions qui permet à tous les éléments de bien s'imbriquer.

Les scientifiques ne savent pas très bien que conclure de notre incapacité à simuler complètement le modèle standard sur ordinateur. Il est difficile de tirer des conclusions solides d'une inaptitude à résoudre un problème ; il est possible que ce soit juste un problème très ardu qui finira par être résolu par des techniques classiques. Mais certains aspects du problème laissent penser qu'il est plus profond que cela. Les obstacles en cause sont intimement liés à des propriétés topologiques et géométriques. La difficulté de modéliser sur réseau des fermions chiraux indique peut-être quelque chose de plus important : que les lois de la physique ne sont pas, fondamentalement, discrètes. Nous n'habitons pas une simulation numérique. ■

articles

- **A. CHO, Controversial test finds no sign of a holographic universe, *Science*, vol. 350, p. 1303, 2015.**
- **C. HOGAN, Exotic rotational correlations in quantum geometry, 2015. arxiv.org/abs/1509.07997**
- **D. KAPLAN, Chiral symmetry and lattice fermions, 2012. arxiv.org/abs/0912.2560**

Les premières ondes **gravitationnelles**

La découverte d'ondes gravitationnelles issues de l'Univers primordial éclairera les liens entre la gravité et la mécanique quantique. En outre, elle validera peut-être l'existence d'autres univers.

Lawrence KRAUSS
est professeur à l'université d'État de l'Arizona, où il est aussi directeur de l'*Origins Project*.

LES ONDES GRAVITATIONNELLES primordiales ont pu être émises au moment de l'inflation de l'Univers, quand celui-ci s'est dilaté exponentiellement en une fraction de seconde. Leur détection prouverait cet épisode et réconcilierait physique quantique et gravitation.

En mars 2014, une collaboration de physiciens exploitant le radiotélescope BICEP-2, installé en Antarctique avait stupéfié le monde. Ils affirmaient avoir observé, au sein du fond diffus cosmologique, un signal émanant du début du temps, à savoir la trace d'ondes gravitationnelles issues de l'Univers primordial un instant après le Big Bang. Cependant, l'analyse a rapidement conduit à l'invalidation des résultats. Peut-être seulement parce que l'intensité de ces ondes gravitationnelles est inférieure au seuil de détection des appareils. D'ailleurs, selon certains, ce n'est qu'une question de temps, peut-être une dizaine d'années. Patience donc.

Toutefois, les ondes gravitationnelles ont refait la une de l'actualité le 11 février 2016. Les collaborations Ligo et Virgo ont en effet annoncé la détection d'ondes gravitationnelles émises par la collision de deux trous noirs à plus de un milliard d'années-lumière de la Terre. Ce n'était pas le témoignage du début de l'Univers, mais, cette fois, les prédictions d'Albert Einstein étaient bel et bien confirmées.

L'observation d'ondes gravitationnelles primordiales est peut-être donc pour bientôt. Et ce sera une révolution pour la physique. Pourquoi ? Parce qu'elle nous aidera notamment à faire le lien entre nos meilleures théories du monde subatomique (quantique) et nos meilleures théories du gigantesque cosmos (la relativité). Accessoirement, elle pourrait apporter des preuves convaincantes de l'existence d'autres univers. Notre exploration du cosmos se trouve à un moment décisif.

La voie de l'inflation

Comment en sommes-nous arrivés à ce moment crucial ? Tout a commencé avec deux paradoxes apparents de l'Univers primordial. Le premier concerne la géométrie de l'Univers à grande échelle. Dans les 13,8 milliards d'années écoulées depuis sa formation par le Big Bang, l'Univers n'a cessé de se dilater, mais même après une longue période d'expansion, il est resté presque parfaitement plat. Un univers tridimensionnel plat, voilà l'univers qu'imaginent la plupart des cosmologistes : dans un tel univers, la lumière se propage, en moyenne, en ligne droite.

Le problème est que, selon la relativité générale, un univers plat n'est qu'un résultat particulier parmi un grand nombre de possibilités. Quand la matière ou le rayonnement était la forme dominante d'énergie dans l'Univers, celui-ci aurait dû en se dilatant s'éloigner rapidement des caractéristiques d'un univers plat. Il suffirait d'un très léger décalage pour qu'aujourd'hui l'Univers apparaisse ouvert (l'espace est courbe comme une selle de cheval) ou fermé (l'espèce est courbe comme la surface d'une sphère). Pour que l'Univers nous apparaisse toujours plat aujourd'hui, ses caractéristiques initiales ont dû être particulièrement uniformisées. Comment l'expliquer ?

Le second paradoxe concerne le fait que l'Univers semble identique dans toutes les directions : il est isotrope. C'est étrange. La lumière d'un côté de l'immense univers observable vient seulement de parvenir jusqu'à l'autre côté. Une telle distance signifie que les régions éloignées de l'Univers n'ont pas pu communiquer les unes avec les autres avant cette date. Comment alors auraient-elles pu évoluer de façon si semblable ?

En 1980, le physicien Alan Guth a trouvé une solution à ces paradoxes : l'Univers, propose-t-il, aurait pu gonfler rapidement après sa naissance, ce qui expliquerait son uniformité actuelle. Cette idée, nommée inflation, s'inspire d'un pan central du modèle standard de la physique des particules, la brisure spontanée de symétrie, qui décrit ce qui se passe quand des forces qui étaient unifiées se séparent.

Il y a de fortes raisons de penser qu'une brisure spontanée de symétrie s'est déjà produite au moins une fois dans l'Univers. D'après la théorie électrofaible, deux des forces fondamentales de l'Univers, à savoir l'interaction électromagnétique et l'interaction faible, nous semblent aujourd'hui différentes uniquement à cause d'un accident qui s'est produit dans l'histoire de l'Univers. À une époque, il s'agissait d'une seule et même force, unifiée.

Mais en se refroidissant, l'Univers, âgé d'un millionième de millionième de seconde, a subi une transition de phase qui a changé la nature de l'espace vide. Au lieu d'être vide, il était empli d'un champ d'arrière-plan. Ce champ d'arrière-plan, le champ de Higgs, s'est développé à travers tout l'Univers.

Le champ de Higgs affecte la façon dont les particules se propagent dans l'espace. Les particules qui interagissent avec ce champ (celles qui sont médiatrices de l'interaction faible, par exemple) sont soumises à une résistance qui leur confère un comportement de particules massives. Celles qui n'interagissent pas avec le champ (par exemple le photon, porteur de l'interaction électromagnétique) restent dépourvues de masse. Par conséquent, l'interaction faible et l'interaction électromagnétique ont commencé à se comporter différemment, brisant la symétrie qui les unifiait. Ce singulier tableau a été validé en 2012 au LHC du Cern, près de Genève, avec la découverte du boson de Higgs.

Peut-être, raisonne Alan Guth, un événement similaire de brisure de symétrie s'est-il produit encore plus tôt dans l'histoire de l'Univers. Avant cet événement, trois des quatre interactions fondamentales de l'Univers – les interactions électromagnétiques et faible, ainsi que l'interaction forte (qui assure la cohésion des noyaux atomiques, constitués de protons et de neutrons), mais pas la gravité – auraient pu être connectées. Et, de fait, un grand nombre de preuves indirectes suggèrent qu'un tel phénomène se serait produit quand l'Univers avait environ 10^{-36} seconde. En se refroidissant, l'Univers a pu

L'ESSENTIEL

- Les physiciens traquent les ondes gravitationnelles émises lors des premiers instants qui ont suivi le Big Bang.
- Une telle découverte offrira une fenêtre sur les premiers instants du temps en prouvant l'inflation cosmique.
- La détection d'ondes gravitationnelles primordiales permettra aussi d'unifier mécanique quantique et gravitation.
- Elles fourniraient également des preuves indirectes de l'existence du multivers, une effervescence infinie d'univers physiquement séparés.

passer par une transition de phase qui a également changé la nature de l'espace, impliquant un champ d'arrière-plan sous l'effet duquel l'interaction électrofaible aurait commencé à se comporter différemment de l'interaction forte – brisant spontanément leur symétrie, ou leur interdépendance.

Comme dans le cas du champ de Higgs, ce champ briseur de symétrie conduirait à des particules exotiques et très massives, mais les masses en question seraient beaucoup plus élevées que celle de la particule de Higgs. En fait, il faudrait construire un accélérateur 10 milliards de fois plus puissant que le LHC pour explorer directement les théories derrière ce phénomène. Nous parlons de théories de grande unification (ou GUT, pour *grand unified theories*) parce qu'elles unifient en une seule force les trois interactions non gravitationnelles de l'univers.

Une telle brisure spontanée de symétrie, à un stade très précoce de l'Univers, pourrait résoudre tous les problèmes du Big Bang standard si, au moins pendant une courte période, le champ responsable de la brisure de symétrie était bloqué dans un « état métastable ». Cet état est celui de l'eau quand la température ambiante chute brusquement en dessous de zéro sans qu'elle gèle immédiatement; quand elle finit par geler, elle libère de l'énergie, la chaleur latente.

De façon similaire, le champ à l'origine de la transition de phase GUT aurait pu brièvement stocker une énorme énergie latente à travers l'espace. Lors de la courte période d'inflation, cette énergie aurait pu entraîner une dilatation exponentielle de l'Univers. Ce qui constitue l'univers observable d'aujourd'hui aurait pu voir sa taille augmenter de plus de 25 ordres de grandeur en moins de 10^{-36} seconde. Une telle expansion aurait également eu tendance à rendre l'univers plat et isotrope, ce qui règle naturellement les deux paradoxes apparents de l'Univers.

Sonder l'Univers

L'idée de l'inflation est séduisante, mais il manque une théorie fondamentale décrivant comment elle se serait déroulée, notamment parce que nous ignorons les détails associés à la grande unification, comme le niveau d'énergie précis auquel les forces auraient été unifiées. Et tandis que les théories d'inflation les plus simples expliquent une bonne partie de ce que nous observons aujourd'hui, des versions différentes de l'inflation auraient pu conduire à des univers radicalement différents.

Nous avons besoin d'un moyen de sonder directement l'Univers à la recherche de preuves de l'inflation et d'explorer en détail la physique associée. C'est exactement ce que les ondes gravitationnelles primordiales permettraient de faire...

Quand Albert Einstein publie sa théorie de la relativité générale en 1915, il comprend qu'elle implique l'existence d'un nouveau et passionnant phénomène physique. Dans la relativité générale, un champ gravitationnel est une distorsion de la trame sous-jacente de l'espace-temps. Une source d'énergie variable dans le temps (par exemple le rapprochement de deux trous noirs) produirait une distorsion variable dans le temps qui se propagerait de la source à la vitesse de la lumière : des ondes gravitationnelles.

Parce que la gravité est si faible par rapport à l'électromagnétisme, les ondes gravitationnelles sont extrêmement difficiles à détecter. Einstein doutait même que nous parvenions un jour à les trouver, mais quelque cent ans après la prédiction de leur existence, Virgo et Ligo ont néanmoins réussi. Qu'en est-il des ondes gravitationnelles primordiales qui résulteraient des champs quantiques fluctuants durant les premiers instants qui ont suivi le Big Bang ?

Quand l'Univers était très jeune, avant l'époque de l'inflation, il était comprimé en un volume très inférieur à celui d'un atome. À des échelles aussi minuscules, les règles de la mécanique quantique s'appliquent. Par ailleurs, la quantité d'énergie accumulée en chaque point de cet espace minuscule étant énorme, nous avons besoin de la théorie de la relativité pour la décrire. Pour comprendre les propriétés de l'Univers primordial, nous devons utiliser les idées de la théorie quantique des champs, qui incorpore à la fois la mécanique quantique et la relativité restreinte (la théorie qui relie l'espace et le temps). La théorie quantique des champs nous dit qu'aux très petites échelles, tous les champs de la mécanique quantique fluctuent violemment. Si tous les autres champs quantiques se comportaient de façon semblable au cours de la période où la densité d'énergie inflationnaire dominait l'expansion de l'Univers, alors les champs gravitationnels fluctuaient probablement eux aussi.

Au cours de l'expansion exponentielle de l'inflation, toute fluctuation quantique initiale de petite longueur d'onde s'est trouvée étirée par l'expansion. Si la longueur d'onde devient suffisamment grande, le temps que met la fluctuation à osciller augmente et devient supérieur à l'âge de l'Univers (qui est alors très jeune). La fluctuation quantique se retrouve essentiellement « gelée » jusqu'à ce que l'Univers soit assez vieux pour qu'elle se remette à osciller. Au cours de l'inflation, l'oscillation gelée croît, un processus qui amplifie ces oscillations quantiques initiales pour donner des ondes gravitationnelles classiques.

À peu près au moment où Alan Guth propose l'inflation, les physiciens russes Alexei Starobinski et Valery Rubakov montrent indépendamment que l'inflation produit toujours un tel fond d'ondes gravitationnelles et que son intensité dépend simplement de l'énergie stockée dans le champ qui entraîne l'inflation. En d'autres termes, si nous pouvons trouver les ondes gravitationnelles de l'inflation, nous avons non seulement une confirmation directe que l'inflation a eu lieu, mais aussi

DE L'INFLATION AUX ONDES GRAVITATIONNELLES

Si une période d'inflation a rapidement dilaté l'Univers juste après sa naissance, nous pourrions peut-être en trouver la preuve dans une des lumières les plus anciennes que nous voyons : le rayonnement fossile ou fond diffus cosmologique micro ondes (CMB), qui a été émis seulement 380 000 ans après le Big Bang. Au cours de l'inflation, les fluctuations quantiques du champ gravitationnel de l'Univers auraient été amplifiées jusqu'à former des ondes gravitationnelles, c'est-à-dire des ondulations de la trame de l'espace-temps. De telles ondes pourraient avoir polarisé le fond diffus.

1 INFLATION
Avant l'inflation, l'Univers est dense et petit. Mais en une minuscule fraction de seconde, l'inflation dilate l'espace de plus de 25 ordres de grandeur.

2 LES ONDES GRAVITATIONNELLES
Au cours de l'inflation, de minuscules fluctuations quantiques du champ gravitationnel qui imprègne l'Univers sont étirées. La longueur d'onde de certaines fluctuations devient tellement grande que leur période d'oscillation excède l'âge de l'Univers (alors très jeune), si bien qu'elles « gèlent » jusqu'à ce que l'Univers soit assez vieux pour qu'elles se remettent à osciller. Quand l'inflation prend fin, ces oscillations sont devenues des ondes gravitationnelles de grande longueur d'onde, qui étirent et compriment tour à tour l'espace qui les entoure (les ellipses).

3 LA POLARISATION
L'alternance de compressions et de dilatations de l'espace par les ondes gravitationnelles modifie dans une direction donnée l'amplitude de la lumière du fond diffus cosmologique qui parvient jusqu'à nos télescopes : en d'autres termes, elle serait polarisée.

4 LES MOULINS À VENT
La polarisation peut prendre plusieurs formes. Les fluctuations locales normales de température et de densité de l'espace produisent un motif radial ou circulaire de polarisation *(cercle orange)*. Mais les ondes gravitationnelles produisent un remarquable motif de moulin à vent *(à droite)*. Les zones rouges correspondent ici aux endroits où l'espace a été comprimé, de sorte que les photons sont plus serrés et le rayonnement est plus chaud. Les zones bleues sont plus froides.

une vision directe des processus quantiques qui l'ont provoquée. Le problème est de les détecter...

Le fond diffus cosmologique pourrait nous aider. Ce rayonnement micro ondes est un vestige, il a été émis quand le jeune Univers s'est suffisamment refroidi, 380 000 ans après le Big Bang, pour que les protons puissent capturer les électrons et former des atomes neutres, rendant l'Univers transparent à la lumière. Des ondes gravitationnelles à grande échelle créées à l'époque où le fond diffus a été émis ont peut-être laissé des signes dans ce fond diffus.

À cette époque, les électrons libres auraient été immergés dans un bain de rayonnement qui était légèrement plus intense dans une direction que dans l'autre parce que les ondes gravitationnelles à grande échelle auraient comprimé l'espace dans une direction et l'auraient étiré dans l'autre. Un effet suffisamment grand aurait pu produire une petite distorsion détectable du fond diffus.

Les ondes gravitationnelles peuvent avoir un autre effet plus subtil. La distorsion spatiale produite par les ondes gravitationnelles pourrait imprimer au rayonnement de fond des électrons diffus une amplitude plus grande le long d'un axe que le long de l'axe perpendiculaire. En d'autres termes, le fond diffus peut être polarisé.

Aux trois coins d'un triangle équilatéral de 1 million de kilomètres de côté, les satellites d'eLISA constitueront un immense interféromètre spatial.

La mesure de la polarisation du fond diffus n'est pas en soi une preuve de l'existence d'ondes gravitationnelles, car cette polarisation a de nombreuses autres causes possibles. Néanmoins, on peut trier. En effet, un motif de torsion serait caractéristique d'ondes gravitationnelles. Les deux modes possibles de polarisation spatiale sont les modes E et B. Les modes B, du type torsion, sont associés aux ondes gravitationnelles, tandis que les modes E sont produits par d'autres sources.

Cet élément, connu depuis 1997, a stimulé la communauté étudiant le fond diffus. De fait, les variations directes de température dues aux ondes gravitationnelles primordiales peuvent être trop faibles pour être détectées parmi d'autres distorsions de température dans le fond diffus. En revanche, une mesure de la polarisation du fond diffus trahirait un signal d'ondes gravitationnelles beaucoup plus faible. Depuis, un grand nombre d'expériences, au sol ou dans l'espace, ont été conçues pour rechercher ce signe de l'inflation.

Parce que les expérimentateurs ont déjà mesuré les fluctuations de température dans le fond diffus cosmologique, les chercheurs présentent leurs résultats sous forme du rapport (noté *r*), d'un possible signal de polarisation des ondes gravitationnelles sur la magnitude des fluctuations de température.

Aujourd'hui, seules les limites supérieures de la polarisation du fond diffus ont été rapportées: elles ne pouvaient pas être plus élevées que ces limites, sinon nous les aurions vues. Le satellite *Planck* de l'Agence spatiale européenne a rapporté que, d'après ses mesures, *r* était compris entre 0 (c'est-à-dire pas d'ondes gravitationnelles du tout) et une limite supérieure d'environ 0,13.

Si BICEP-2 n'a pas détecté d'ondes gravitationnelles primordiales, une foule de nouvelles expériences sont en préparation pour y remédier. Citons *eLISA*, de l'ESA, dont le satellite test *LISA Pathfinder* a été lancé en juillet 2015. Celui-ci doit valider les technologies retenues. À terme, ce sont trois satellites qui, aux trois coins d'un triangle équilatéral de 1 million de kilomètres de côté, constitueront un immense interféromètre spatial éloigné de toute perturbation terrestre. Selon Pierre Binétruy, du laboratoire Astroparticule et cosmologie: « Avec cet observatoire spatial, il est possible qu'on puisse détecter des ondes gravitationnelles produites très peu de temps après le Big Bang. »

Qu'apportera à la physique une telle observation? D'abord, elle confirmerait une prédiction fondamentale de la relativité générale, mais elle renseignerait aussi sur la physique qui opérait quand l'Univers n'avait que 10^{-36} seconde.

Ensuite, la découverte d'ondes gravitationnelles de l'inflation bouleversera les deux piliers de la physique. Nous avons vu que de telles ondes ont pu être générées quand les fluctuations quantiques primordiales du champ gravitationnel ont été amplifiées au cours de l'inflation. Dans ce cas, la gravité doit alors être décrite par une théorie quantique.

La question est particulièrement importante parce que nous n'avons, pour l'instant, pas de théorie quantique de la gravité bien définie, c'est-à-dire aucune théorie qui décrive la gravité au moyen des règles gouvernant le comportement de la matière et de l'énergie aux plus petites échelles. La théorie des cordes est peut-être la meilleure ébauche pour l'instant, mais rien ne prouve qu'elle soit correcte ou qu'elle puisse résoudre tous les problèmes qu'une théorie quantique complète de la gravitation doit prendre en compte.

De plus, comme le remarque Freeman Dyson de l'Institut des études avancées de Princeton, dans le New Jersey, il n'existe pas de dispositif terrestre capable de détecter les gravitons (les hypothétiques particules quantiques vectrices de la force de gravité) parce qu'un détecteur de ce type devrait être tellement grand et dense qu'il s'effondrerait sur lui-même en trou noir avant d'avoir pu effectuer la moindre observation. Ainsi, spécule-t-il, nous ne pourrons jamais affirmer

que la gravité est décrite par une théorie quantique. La découverte d'ondes gravitationnelles de l'inflation réduirait à néant cet argument.

Un problème demeure. Grâce aux éventuelles ondes gravitationnelles de l'inflation, qui sont des objets classiques (non quantiques), nous pourrons calculer leur origine à l'aide de la mécanique quantique. Mais tout résultat de physique classique, y compris le mouvement d'une balle de tennis, peut être calculé par la mécanique quantique. Le simple fait de voir une balle de tennis en vol ne prouve pas que la mécanique quantique y soit pour quelque chose ; en effet, son mouvement serait identique même sans mécanique quantique. Ce qu'il nous faut prouver, c'est que la génération des ondes gravitationnelles de l'inflation, contrairement au mouvement de la balle de tennis, dérive de processus quantiques.

Récemment, avec Frank Wilczek, de l'Institut de technologie du Massachusetts, nous avons résolu ce problème. En utilisant l'analyse dimensionnelle (cette technique explore les phénomènes physiques *via* leur représentation dans des unités décrivant la masse, l'espace et le temps), nous avons réussi à montrer en termes très généraux qu'un fond d'ondes gravitationnelles causées uniquement par l'inflation s'évanouirait si la constante de Planck (la quantité qui gouverne l'ampleur des effets quantiques dans le monde) devait disparaître. Ainsi, avec des ondes gravitationnelles de l'inflation, la gravité doit obligatoirement être décrite par une théorie quantique.

Dans la perspective de comprendre les origines de notre Univers et la question de son existence même, sonder l'inflation par l'observation des ondes gravitationnelles pourrait faire accéder au statut de théorie physique solide l'hypothèse du multivers, que beaucoup considèrent aujourd'hui comme une des plus grandes spéculations métaphysiques.

Rappelons que l'inflation est entraînée par un champ qui stocke et libère de prodigieuses quantités d'énergie au cours d'une transition de phase. Or les caractéristiques nécessaires de ce champ impliquent qu'une fois le processus enclenché, le champ qui entraîne l'inflation a tendance à continuer de dilater l'Univers à l'infini. L'inflation se poursuivra sans fin, empêchant la création de l'Univers tel que nous le connaissons parce que toute matière et tout rayonnement préexistants seraient complètement dilués par l'expansion, ne laissant rien derrière que de l'espace vide en expansion rapide.

Cependant, Andrei Linde, physicien à l'université de Stanford, a trouvé un moyen d'échapper à ce problème. Il a montré qu'à condition qu'une petite région de l'espace ait achevé sa transition de phase après une expansion suffisante, cette région pourrait englober tout l'Univers que nous observons aujourd'hui. Dans le reste de l'espace, l'inflation pouvait se poursuivre infiniment, avec de petites « graines » se formant çà et là, aux endroits où la transition de phase a pu arriver à son terme. De chacune de ces graines émergerait un univers isolé subissant une expansion chaude de type de Big Bang.

Dans un tel tableau d'inflation « éternelle », notre Univers ne constitue donc qu'une petite partie d'une structure beaucoup plus grosse qui pourrait être infiniment grande. Elle pourrait contenir un nombre arbitrairement grand d'univers déconnectés qui peuvent s'être déjà formés, être en formation ou se former dans le futur. De plus, parce que la transition de phase qui met fin à l'inflation peut se dérouler différemment dans chaque graine, la physique qui gouverne chaque univers résultant peut être différente.

Cette hypothèse, dite du multivers, suggère que notre Univers n'en serait qu'un parmi une quantité faramineuse. Dans ce cas, les constantes physiques sous-jacentes de notre Univers sont peut-être ce qu'elles sont par pur hasard. Si elles avaient été différentes, les êtres que nous sommes n'auraient pas pu évoluer pour les mesurer.

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Cette suggestion, qu'on qualifie souvent de principe anthropique, fait horreur à beaucoup de physiciens et conduit à une foule de problèmes possibles qui resteraient à résoudre. Et pour beaucoup de personnes, les multivers et le principe anthropique montrent à quel point la physique fondamentale est en train de s'éloigner de ce qu'elles considèrent comme la science empirique solide.

En sondant les phénomènes de l'inflation et de la grande unification, nous pourrions parvenir à déterminer de façon univoque la physique fondamentale qui gouverne l'Univers à ces échelles d'énergie et de temps. Un des résultats pourrait être que la transition inflationnaire produisant notre Univers observé nécessite l'inflation éternelle de Linde. Dans ce cas, même si nous restons à jamais dans l'impossibilité d'observer directement les autres univers, nous pourrons être aussi convaincus de leur existence que nos ancêtres du début du XX[e] siècle étaient certains de l'existence des atomes alors qu'ils n'avaient pas encore les moyens de les observer directement.

Nous sommes peut-être à un tournant de la physique, un peu comme l'étaient les physiciens d'il y a un siècle aux prises avec des expériences déconcertantes qui allaient déboucher sur la formalisation de la théorie quantique. L'exploration de la polarisation du rayonnement fossile ouvrira sans doute une nouvelle fenêtre sur l'Univers, nous ramenant jusqu'au commencement du temps, et à des distances et phénomènes en comparaison desquels la folle aventure de la physique au XX[e] siècle semblerait bien fade. ■

livre

• L. KRAUSS., ***A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing***, **Free Press, 2012.**

articles

• **V. DOMCKE, Probing inflation models with gravitational waves, 2016. arxiv.org/abs/1605.06364**

• **D.-H. KIM et S. TRIPPE, Primordial gravitational waves and rescattered electromagnetic radiation in the cosmic microwave background, 2016. arxiv.org/abs/1607.03779**

• **L. KRAUSS *et al.*, Primordial gravitational waves and cosmology, *Science*, vol. 328, pp. 989-992, 2010.**

• **M. KAMIONKOWSKI *et al.*, Statistics of cosmic microwave background polarization, *Physical Review D*, vol. 55, pp. 7368-7388, 1997.**

Le principe d'équivalence en **question**

L'égalité entre la masse qui mesure l'inertie et la masse qui détermine la gravitation est au fondement de la relativité générale d'Einstein : c'est le principe d'équivalence. On le teste désormais sur des objets quantiques.

Domenico GIULINI
est professeur de physique théorique à l'université Leibniz, à Hanovre en Allemagne.

L'ESSENTIEL

- **Le principe d'équivalence, l'un des fondements de la relativité générale, stipule que la masse gravitationnelle et la masse inertielle sont identiques.**
- **Des physiciens ont entrepris de tester la validité de ce principe à l'échelle d'un système quantique.**
- **Ces travaux soulèvent de délicates questions d'interprétation.**
- **Ils pourraient aussi éclairer les liens entre la gravitation et la théorie quantique.**

Quel est le plus lourd ? Un kilo de plume ou un kilo de plomb ? Cette question leurre un enfant, mais pas vous. Passons à plus difficile ? Dans le vide, qu'est-ce qui tombe le plus vite ? Une plume ou une boule de pétanque ? La réponse est évidente : ils tombent de la même façon et aussi vite. C'est bien le cas, du moins en apparence, c'est-à-dire dans la limite des incertitudes de mesure. Pour valider expérimentalement le principe de la chute identique de corps différents, encore faut-il disposer d'une théorie dont les hypothèses fondamentales sont formulées de façon claire et complète, et reliées par des chaînes logiques à des prédictions testables. Or il n'est pas sûr que ce soit le cas pour la gravitation.

En effet, les deux grands pans de la physique fondamentale que sont la théorie de la relativité générale d'Einstein et la théorie quantique soulèvent des problèmes d'interprétation quand on tente de tester la première à l'aide d'une expérience faisant intervenir la seconde. Une telle difficulté est apparue lorsque des physiciens ont testé le « principe d'équivalence », un fondement de la relativité générale, avec une expérience mettant en jeu la théorie quantique.

Plusieurs théories physiques passent pour fondamentales : chacune décrit une grande gamme de phénomènes dans les limites de la précision de mesure. Elles sont applicables de façon universelle et ne se contredisent pas dans leurs conséquences. La relativité générale et la théorie quantique sont de telles théories, et elles ont résisté jusqu'ici à tous les tests expérimentaux.

Des constantes dites fondamentales leur sont attachées. Il s'agit de la vitesse de la lumière c et de la constante gravitationnelle G dans le cas de la relativité générale, et de la constante de Planck h dans le cas de la théorie quantique. La dimension (au sens physique de la longueur, de la masse, du temps) de la vitesse de la lumière est une longueur divisée par un temps. Celle de la constante gravitationnelle, plus compliquée, découle de la loi d'attraction universelle de Newton ($F = Gmm'/r^2$). Quant à la constante de Planck h, elle a la dimension d'une action, c'est-à-dire du produit d'une énergie par un temps. Pour cette raison, on la nomme aussi le quantum d'action.

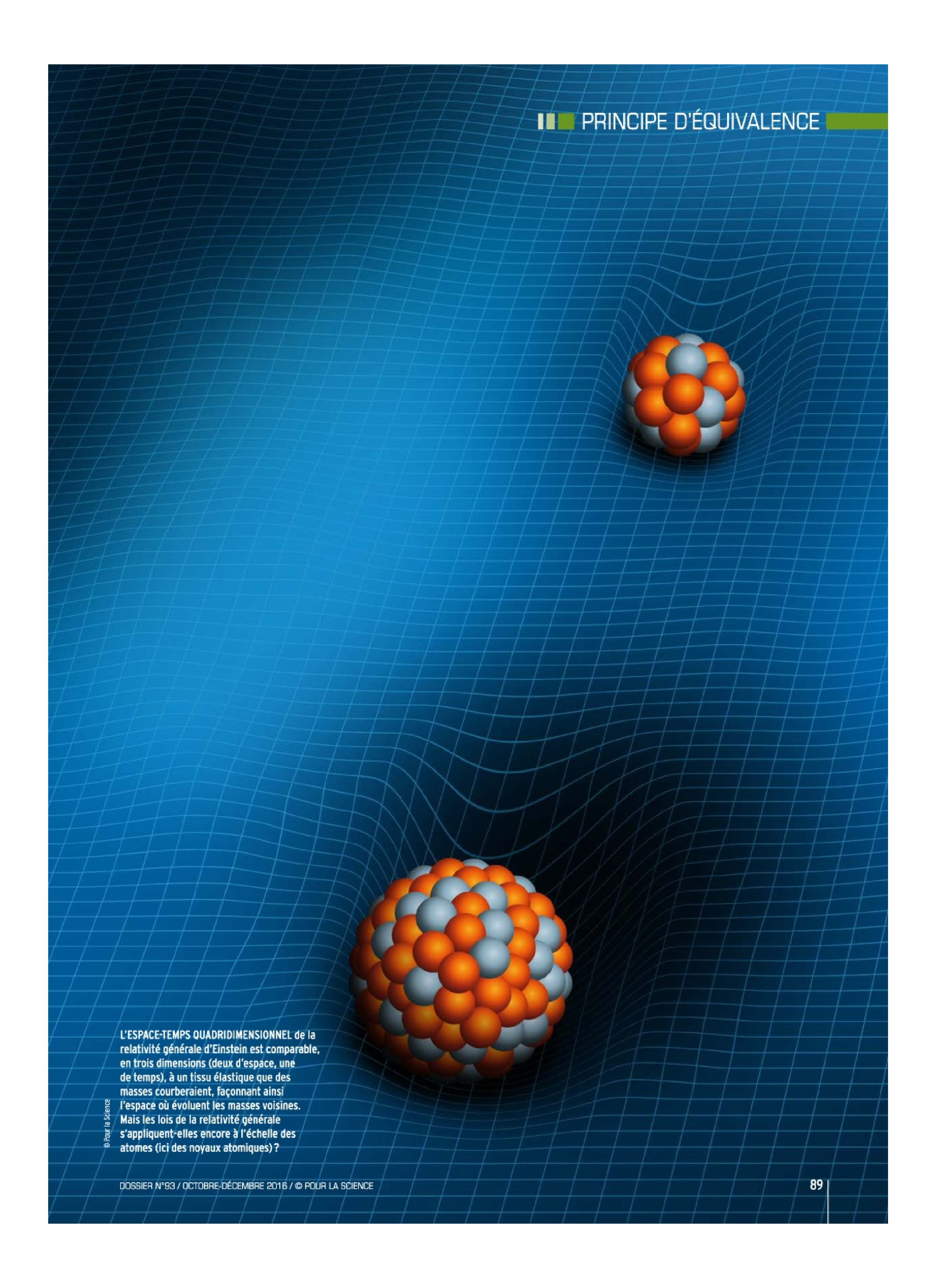
Les unités de Planck

Du point de vue de leur dimension, ces trois constantes fondamentales combinent des unités de longueur, de temps ou de masse. Inversement, on peut les associer pour former un système d'unités – les « unités de Planck » : la longueur de Planck $L_P = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1{,}62 \times 10^{-35}$ mètre, la masse de Planck $M_P = \sqrt{\hbar c/G} = 2{,}18 \times 10^{-8}$ kilogramme et le temps de Planck $T_P = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5{,}39 \times 10^{-44}$ seconde (on utilise ici la constante de Planck réduite $\hbar = h/(2\pi)$. Ces unités indiquent, grossièrement, à quelles échelles d'espace-temps et de masse (ou d'énergie) la théorie quantique et celle de la relativité générale devraient se rejoindre. Dans ces situations, les phénomènes physiques sont censés ne plus pouvoir être décrits que dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation, dont la mise au point se fait attendre.

D'ordinaire, les effets gravitationnels et les effets quantiques se manifestent à des échelles très différentes, de sorte que les mesurer simultanément exige des précisions énormes. Les échelles indiquées par les unités de Planck sont si petites qu'il semble exclu de pouvoir s'en approcher expérimentalement.

Cependant, a-t-on vraiment besoin de construire une théorie quantique de la gravitation pour savoir si un atome tombe comme une pierre ? Et en a-t-on besoin pour s'interroger sur le sens de cette question quand l'atome se trouve dans un état de position ambigu – une superposition d'états comme en prévoit la théorie quantique ?

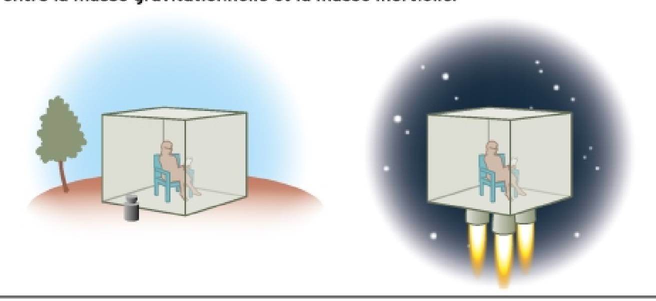
Pas vraiment, car les rapports réciproques de la matière et de la gravitation sont clairement régis par ce principe fondamental de la relativité générale qu'est le principe d'équivalence. Il stipule que la masse gravitationnelle (la grandeur en jeu



L'ESPACE-TEMPS QUADRIDIMENSIONNEL de la relativité générale d'Einstein est comparable, en trois dimensions (deux d'espace, une de temps), à un tissu élastique que des masses courberaient, façonnant ainsi l'espace où évoluent les masses voisines. Mais les lois de la relativité générale s'appliquent-elles encore à l'échelle des atomes (ici des noyaux atomiques) ?

Le principe d'équivalence

Un observateur est incapable de distinguer entre l'accélération que lui impriment les masses à l'origine d'un champ gravitationnel et une accélération qu'il subirait dans le vide de l'espace en l'absence de champ de gravitation : les effets d'une accélération sont indistinguables de ceux d'un champ de gravitation. Cette absence de distinction résulte de l'équivalence entre la masse gravitationnelle et la masse inertielle.



dans la chute des corps) et la masse inertielle (la masse liée à l'inertie, c'est-à-dire le facteur de proportionnalité entre la force et l'accélération) sont identiques. En vertu de ce principe, un corps plongé dans un champ gravitationnel, tel celui de la Terre, se comporte en tout point comme un corps soumis à une accélération en l'absence de champ gravitationnel. Il nous est ainsi impossible de savoir, sans autre indice, si la force qui nous plaque contre le plancher d'un ascenseur est notre propre poids ou si elle résulte de l'accélération uniforme de la cabine en l'absence de toute attraction gravitationnelle *(voir l'encadré ci-dessus)*.

En 1884 déjà, le physicien allemand Heinrich Hertz décrivait dans ses cours magistraux le fait que « deux quantités de matière ont les mêmes effets gravitationnels si elles ont la même inertie, quels que soient les matériaux qui les constituent ». Il s'étonnait du fait que ces deux propriétés puissent être décrites de façons indépendantes, mais s'avèrent expérimentalement équivalentes. Il supposait qu'une explication « simple et compréhensible en serait possible, laquelle nous donnerait des aperçus profonds sur la constitution de la matière ».

Trente ans plus tard, Albert Einstein fournissait enfin cette explication avec sa théorie de la relativité générale. Il y unifiait l'inertie et la gravitation par l'intermédiaire d'une structure géométrique commune à l'espace et au temps : l'espace-temps. Au contraire de l'espace rigide et indépendant de la matière donné une fois pour toutes en physique newtonienne, la structure de l'espace-temps est sans cesse modifiée par la matière et ses mouvements. Pour un physicien, cette interdépendance de la matière et de l'espace-temps est plus satisfaisante que l'action unilatérale exercée par un espace « absolu » sur la matière dans la conception newtonienne.

La conception géométrique de la gravitation n'a de sens que si toutes les formes de masse et d'énergie « voient » la même structure d'espace-temps et y réagissent de façon universelle. C'est exactement ce qu'exprime le principe d'équivalence. Aujourd'hui, une formulation standard s'en est dégagée, qui combine trois propositions.

L'universalité de la chute libre

La première est qu'une masse test (une masse assez petite pour que sa propre attraction gravitationnelle soit négligeable) suit dans un champ gravitationnel une trajectoire qui ne dépend que de sa position, de l'instant et de sa vitesse de départ. Sur Terre, il s'ensuit que deux objets qu'on laisse tomber au même endroit et au même instant sont accélérés de façon identique, si le frottement de l'air est négligeable : en d'autres termes, tous les corps lâchés dans les mêmes conditions initiales tombent à la même vitesse. Galilée avait déjà compris l'universalité de la chute libre, qu'il est ou non lâcher des boules du haut de la tour de Pise.

Pour mettre en évidence une éventuelle violation de l'universalité de la chute libre, il faudrait des mesures assez précises montrant que l'égalité entre masse gravitationnelle et masse inertielle n'est pas toujours vraie. Le paramètre d'Eötvös, noté η (êta) et nommé d'après le physicien hongrois Loránd Eötvös (1848-1919), a été défini pour caractériser l'étendue de la violation : il est égal à la différence entre les masses gravitationnelle et inertielle, divisée par leur valeur moyenne. Au début du XXe siècle, Eötvös a pu établir à l'aide de balances de torsion que η est inférieur à 10^{-8}, soit un centième de millionième. Cette limite a été divisée par 100 000 par l'équipe du projet *Eöt-Wash*, de l'université de Washington à Seattle, grâce à des masses tests en béryllium et en titane.

Des expériences sont en préparation pour réduire d'un facteur 100 cette limite actuelle de η (pour atteindre 10^{-15}). L'une d'elles, où une masse test en alliage de platine et de rhodium chutera de concert avec une masse test de titane, est embarquée à bord du satellite *Microscope* du CNES qui a été placé en orbite en avril 2016. Il est aujourd'hui en phase d'étalonnage. Jusqu'ici le principe d'équivalence est vérifié.

La deuxième proposition du principe d'équivalence dans sa formulation standard est le fait que le résultat d'une expérience physique menée en un lieu ne dépend ni de son orientation dans l'espace ni de sa vitesse. Ce fondement de la pensée d'Einstein sur l'espace-temps traduit le dépassement du concept d'éther auquel faisaient appel les théories anciennes. En effet, si quelque substance portant ce nom remplissait l'Univers, on s'attendrait à ce qu'un mouvement par rapport à elle exerce une influence sur les phénomènes physiques.

C'est ce qu'avaient tenté de mettre en évidence Albert Michelson et Edward Morley dans une célèbre expérience, réalisée en 1887 à l'université d'État de Cleveland, aux États-Unis. Dans cette expérience, un faisceau lumineux est scindé en deux sous-faisceaux qui parcourent des chemins perpendiculaires, avant de se rejoindre et interférer dans un même détecteur *(voir la figure page suivante)*. Comme la figure d'interférence est très sensible aux temps de parcours des deux sous-faisceaux, elle permet de mesurer avec précision une éventuelle différence entre les vitesses de la lumière dans deux directions différentes. Le résultat de cette expérience fut négatif, et l'est resté depuis, quelle que soit la précision expérimentale atteinte.

Décalage vers le rouge

La troisième proposition du principe d'équivalence dans sa formulation standard est l'idée qu'un champ gravitationnel influe sur des horloges qui y sont soumises. La théorie de la relativité générale indique en effet que la fréquence du rayonnement émis par un atome placé dans un champ gravitationnel est perçue comme plus basse par un observateur situé en un lieu de potentiel gravitationnel supérieur. Il s'agit du « décalage gravitationnel vers le rouge ».

À propos de cet effet, le principe d'équivalence fournit deux règles générales. La première est que des horloges fonctionnant selon des principes différents et suivant la même trajectoire dans l'espace-temps doivent rester synchrones. Un exemple de test de cette règle est fourni par le cas de deux horloges atomiques, l'une au césium et l'autre à hydrogène qui seront toutes deux embarquées à bord de la Station spatiale internationale, dans le cadre de l'expérience *ACES*, *(voir l'encadré page 93)*.

La seconde règle est que deux horloges de construction identique et qui suivent des trajectoires différentes dans un champ gravitationnel afficheront une différence de temps qui est universelle, c'est-à-dire qu'elle dépend seulement du champ gravitationnel traversé, et pas du type d'horloge ni des autres champs présents.

On décrit les possibles violations de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge à l'aide d'un paramètre noté α, qui est nul si le principe d'équivalence est valide. Le meilleur test de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge a été réalisé en 1976 au cours de l'expérience *Gravity Probe A*, où une fusée américaine emporta jusqu'à 10 000 kilomètres d'altitude un maser à hydrogène. Durant les deux heures du vol, les chercheurs comparèrent le temps donné par cette horloge atomique à celui d'une horloge identique restée sur Terre, ce qui a imposé à α une limite supérieure égale à 7×10^{-5}.

Cette expérience a fonctionné parce que le champ gravitationnel de la Terre varie avec l'altitude, ce qui fait évoluer la fréquence relative des deux horloges d'environ 10^{-16} par mètre. Les horloges les plus précises d'aujourd'hui – les horloges atomiques optiques – sont dix fois plus précises que les masers à hydrogène, c'est-à-dire qu'elles ne varient que d'une seconde en 10^{17} secondes, soit à peu près trois milliards d'années. Des chercheurs de l'Institut américain des étalons et de la technologie (le NIST) ont pu mettre en évidence le décalage gravitationnel vers le rouge à une altitude de seulement 33 centimètres. Toutefois, les horloges atomiques optiques ne pourront améliorer la précision de *Gravity Probe A* que si on les porte à des altitudes de plusieurs kilomètres.

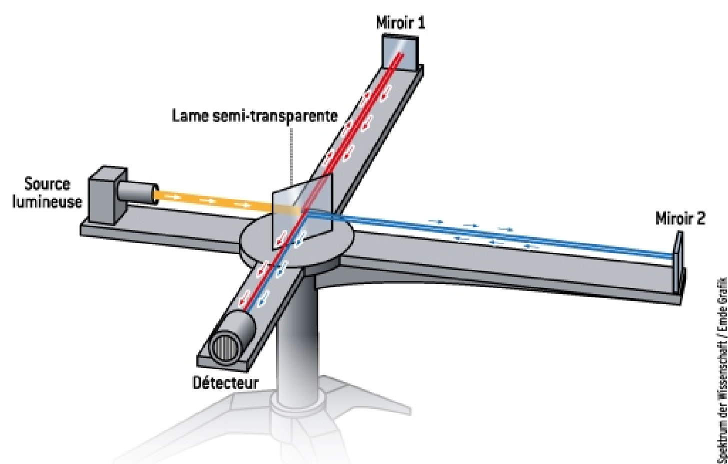
Point remarquable, la troisième partie du principe d'équivalence a été testée avec une plus grande précision qu'avec les deux premières. Or la validité du principe d'équivalence ne saurait être que celle de sa partie la plus faible! Cette situation pousse les physiciens à concevoir de nouvelles expériences portant sur le décalage gravitationnel vers le rouge.

L'idée du quantique

Ainsi vint l'idée d'expériences fondées sur des processus quantiques et se déroulant non pas à des échelles cosmiques, mais à des échelles atomiques. Certes, confronter le monde quantique avec le monde de la relativité générale exige d'énormes efforts. Mais les physiciens espèrent de nouveaux aperçus fondamentaux de ces tests poussés du principe d'équivalence. Or nous ne sommes pas sûrs de connaître toutes les forces à l'œuvre dans l'Univers, de sorte que tout indice sur cette question serait précieux.

Aujourd'hui, on connaît quatre interactions fondamentales : les deux forces agissant à l'échelle subatomique, les interactions dites forte et faible, et les deux forces plus familières que sont l'électromagnétisme et la gravitation, qui déterminent les structures physiques depuis l'échelle atomique jusqu'à l'échelle cosmique. Si l'on suppose qu'il existe d'autres interactions, si faibles qu'elles ne modifient pas la structure de la matière, pourrait-on les observer ?

Le physicien américain Robert Henry Dicke (1917-1997) s'est posé cette question dès la fin des années 1950. Il souligna que des interactions supplémentaires violant le principe d'équivalence pourraient se manifester par leurs effets sur la gravitation. Ce serait en particulier le cas s'il existait un champ de force supplémentaire n'agissant pas sur la totalité de la masse au sens d'Einstein (la grandeur m vérifiant $E = mc^2$), à laquelle contribuent toutes les formes d'énergie. Au lieu de cela, cette force supplémentaire pourrait dépendre de la nature de la matière, ce qui violerait le principe de



L'EXPÉRIENCE DE MICHELSON-MORLEY. Une onde lumineuse est scindée par une lame séparatrice en deux sous-faisceaux, qui convergent après avoir parcouru deux chemins perpendiculaires. La position des franges d'interférence observées sur un écran dépend de la différence entre les temps de parcours. Les temps de parcours étant toujours identiques, on en déduit que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de l'observateur : c'est une constante absolue.

l'universalité de la chute libre. C'est pourquoi il est important d'effectuer des tests expérimentaux en utilisant des matériaux divers, dont on comparera les effets gravitationnels subis.

Jusqu'ici purement hypothétique, la possibilité de ces forces supplémentaires apparaît déjà dans les théories d'unification des interactions fondées sur des espaces-temps à plus de quatre dimensions, dont la théorie des cordes est un exemple. Les violations de l'universalité de la chute libre pourraient s'y manifester pour des valeurs du paramètre d'Eötvös de l'ordre de 10^{-15}, gamme de valeurs dont se rapprochent les expériences prévues.

La façon la plus simple de mesurer l'accélération due à la gravitation à la surface de la Terre consiste à mesurer l'altitude d'un objet, à le lâcher, puis à chronométrer sa chute. Peut-on reproduire cette expérience familière à l'échelle atomique ? Hormis les difficultés techniques, la dualité onde-corpuscule, c'est-à-dire le fait que tout objet quantique est de nature à la fois corpusculaire et ondulatoire, peut être mise à profit. Elle implique en effet qu'au mouvement du centre de masse d'un objet quantique tel qu'un atome est associée la propagation d'une onde de matière.

Dès lors, il devient possible de réaliser des expériences d'interférence, c'est-à-dire d'exploiter le fait que, comme les autres ondes, les ondes de matière peuvent interférer. On peut ainsi concevoir des dispositifs qui scindent les ondes de matière et les réunissent à nouveau pour les faire interférer et produire une figure d'interférence, laquelle livre des informations sur le champ gravitationnel traversé par les ondes.

En 1999, l'équipe de Steven Chu, à l'université Stanford, a pu mesurer, en faisant appel à des procédures quantiques, le temps de chute d'un atome de césium. Ils ont atteint une précision de trois parties pour un milliard, valeur qu'ils ont comparée avec le temps de chute d'un corps macroscopique en verre (un petit prisme pyramidal), mesuré avec précision à l'aide de lasers. Aux incertitudes de mesure près, ils ont ainsi déterminé que le paramètre d'Eötvös, pour un unique atome de césium et l'objet en verre, est inférieur à 10^{-9}.

Quatre ordres de grandeur séparent cette limite de celles déterminées antérieurement. Ce résultat ne semble pas spectaculaire, mais il est tout de même remarquable en raison de la nouveauté de la comparaison effectuée : d'un côté, un atome isolé dans un état quantique, et de l'autre un objet macroscopique ! Les chercheurs ont donc réussi à tester la validité de l'universalité de la chute libre en comparant le comportement dans le champ gravitationnel terrestre d'un élément de matière « quantique » (l'atome) avec un élément de matière « classique » (l'objet macroscopique en verre).

Curieusement, cette même expérience pourrait aussi servir à tester l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge, du moins d'après une interprétation proposée en 2010 par Holger Müller, de l'université de Californie à Berkeley. Dans ce cas, le paramètre mesurant la violation de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge pourrait passer au-dessous de 10^{-9}, ce qui améliorerait le test de la validité du principe d'équivalence.

Qu'est-ce qu'une horloge ?

Les problématiques fondamentales en jeu concernent aussi bien notre compréhension de la théorie quantique que la question : qu'est-ce qu'une horloge ? Afin de mieux comprendre, précisons en quoi consiste l'expérience d'interférométrie atomique effectuée en 1999 par le groupe de Steven Chu. Ils ont réalisé un interféromètre atomique, c'est-à-dire un dispositif conçu pour faire interférer plusieurs ondes de matière, issues en fait du même atome.

L'appareil est construit de façon à produire un choc élastique (où l'énergie cinétique est conservée) entre un photon laser bien choisi et l'atome. Sous l'effet de cette interaction, l'atome a la même probabilité d'être mesuré dans l'un des deux états de quantité de mouvement, sans que l'on puisse savoir dans lequel des deux il se trouve avant la mesure.

En d'autres termes, une première impulsion laser – l'impulsion séparatrice – place l'atome dans une superposition quantique des deux états de la quantité de mouvement, ce qui revient à dire que l'atome emprunte simultanément deux trajectoires… Et si l'impulsion laser est émise verticalement, les deux trajectoires atomiques atteignent des altitudes différentes. Une autre impulsion laser agissant sur chaque onde atomique comme un miroir – l'impulsion unificatrice – réunit ensuite les deux trajectoires, ce qui fait interférer les deux ondes de matière.

La figure d'interférence est déterminée par le déphasage des deux ondes atomiques, qui traduit

la différence des chemins parcourus. Ce déphasage détermine où l'interférence est constructive (probabilité élevée de trouver l'atome) et où elle est destructive (probabilité faible).

Or le calcul en théorie quantique montre que le déphasage $\Delta\phi$ est proportionnel à l'accélération gravitationnelle locale (la pesanteur *g*), à la quantité de mouvement transférée par le photon laser et au carré du temps d'interrogation (le temps *T* écoulé entre l'impulsion séparatrice et l'impulsion unificatrice) : $\Delta\phi = kgT^2$, où *k* est, à un facteur simple près, la quantité de mouvement transférée. Ainsi, la forme des interférences livre, *via* le déphasage, la valeur du champ gravitationnel pendant la chute libre de l'atome placé dans une superposition quantique d'états.

Pourvu que la valeur du champ trouvée soit la même que celle s'appliquant à celle de la masse test en verre, on a ainsi testé l'universalité de la chute libre d'une nouvelle façon, par un procédé quantique. Mais le même interféromètre permet-il aussi de tester l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge?

D'après les physiciens qui pensent que oui, chaque atome équivaut à une horloge battant à un certain rythme. D'après la théorie de la relativité générale, l'horloge de l'onde atomique allant plus haut que l'autre se trouve soumise à un potentiel gravitationnel supérieur; elle bat donc la mesure plus vite jusqu'à la fin de son parcours, ce qui contribue au déphasage des deux ondes. Or cette contribution gravitationnelle est proportionnelle à la différence des potentiels gravitationnels, qui dépend de la différence des altitudes atteintes, qui dépend à son tour de la quantité de mouvement transférée *k* et du temps *T*. En fait, on trouve exactement la même formule ($\Delta\phi' = kgT^2$), où $\Delta\phi'$ désigne cette fois le déphasage dû au décalage gravitationnel vers le rouge.

Une horloge propre à l'atome?

Toutefois, ce calcul est fondé sur une hypothèse : que les atomes de césium fournissent bien un signal d'horloge. Pour cela, ils doivent battre le temps assez vite pour qu'un décalage vers le rouge soit mesurable. Nous avons déjà indiqué qu'avec des horloges atomiques, un décalage gravitationnel vers le rouge a pu être mesuré avec une différence d'altitude de 33 centimètres, mais dans l'expérience de 1999, cette différence n'était que d'un dixième de millimètre… Pour parvenir à une précision relative de 10^{-9}, l'horloge doit battre plus vite en proportion – de l'ordre de 10^{12} fois plus vite que la meilleure horloge atomique actuelle.

C'est le cas si l'on considère que l'atome bat le temps à sa « fréquence de Compton », égale à l'énergie totale de l'atome divisée par la constante de Planck. Cette fréquence de Compton est extrêmement élevée : de l'ordre de 3×10^{25} hertz, c'est-à-dire supérieure d'un facteur 10^{12} aux fréquences typiques des horloges atomiques… Notons toutefois que l'hypothèse que les atomes de césium peuvent être considérés comme des horloges naturelles n'est

UNE HORLOGE DANS L'ESPACE POUR TESTER LA RELATIVITÉ

Une des prédictions centrales de la relativité générale est que la gravitation modifie les fréquences d'horloge, un effet nommé décalage vers le rouge dû à la gravitation. Ce décalage gravitationnel joue un rôle important dans la mesure du temps, et il a été testé avec une grande précision. L'amélioration de cette précision constitue l'objectif principal du projet *ACES*. Des horloges atomiques fourniront des signaux électromagnétiques périodiques dans l'environnement de chute libre de la Station spatiale internationale (ISS) afin de vérifier que les fréquences d'horloge dépendent du potentiel gravitationnel, comme le prévoit la relativité générale. Ce sera fait par l'échange de signaux électromagnétiques entre les horloges sur l'ISS et des horloges au sol. Le mouvement de l'ISS et des antennes au sol sera contrôlé pour prendre en compte les décalages par effet Doppler qui apparaissent nécessairement dans ces comparaisons d'horloge.

Après l'invention des fontaines à atomes froids, en 1989, les physiciens du Syrte et du laboratoire Kastler-Brossel ont eu l'idée d'en mettre une en orbite, où l'état d'apesanteur ne limite plus le temps d'interrogation des atomes. Cette idée est sur le point de se concrétiser avec l'horloge Pharao (Projet d'horloge atomique à refroidissement d'atomes en orbite) qui est le cœur d'*ACES*. Ce projet a débuté en 1997 sous l'égide du CNES et l'ESA. La première étape a consisté à miniaturiser et à améliorer la robustesse d'une fontaine à atomes froids de façon à ce qu'elle résiste aux contraintes d'un voyage dans l'espace. Cette horloge sera arrimée à l'ISS, courant 2018. Elle permettra de tester le décalage gravitationnel avec une précision inégalée en comparant le rythme de ses battements avec ceux d'horloges atomiques restées sur Terre. L'incertitude de la mesure devrait atteindre environ 2×10^{-6}, ce qui améliorera la limite actuelle fournie par l'expérience *Gravity Probe-A* d'un facteur 70 !

La précision redoutable de Pharao et des horloges terrestres permet d'envisager un renversement de situation : au lieu d'utiliser les horloges de précision pour vérifier la validité de la théorie de la relativité générale, on envisage d'utiliser ce décalage pour déduire le champ gravitationnel. Une horloge comme PHARAO, dont l'exactitude relative est de 10^{-16}, décèle une différence de potentiel pour un mètre d'altitude. Avec les meilleures horloges terrestres (horloges optiques), on pourra mesurer des différences d'altitude de 1 centimètre seulement : si l'horloge est un centimètre plus haut ou plus bas, elle va battre plus vite ou plus lentement. Ainsi, rien qu'en mesurant l'effet de décalage gravitationnel en deux endroits et en le comparant, on peut déduire la différence des potentiels terrestres, et donc la différence d'altitude. Cela ouvre la voie à une géodésie chronométrique qui aidera à déterminer le potentiel terrestre et ses fluctuations avec une précision jamais atteinte.

Peter Wolf

Laboratoire Syrte (Systèmes de Référence Temps-Espace) du CNRS, de l'Observatoire de Paris, du LNE et de l'université Pierre-et-Marie-Curie.

pas nécessaire pour déterminer le déphasage des deux ondes atomiques : elle ne sert qu'à interpréter ce déphasage comme un équivalent au décalage gravitationnel vers le rouge, ce qui nous ramène à la question fondamentale autour de laquelle tourne la controverse des chercheurs : les atomes de césium sont-ils des horloges naturelles ?

Le long des deux chemins parcourus dans l'interféromètre, l'énergie des atomes a une valeur bien définie. Ce n'est que pendant la durée très brève de l'interaction avec le laser que certains des atomes sautent d'un état stationnaire d'énergie à un état voisin. Une véritable horloge, en revanche, pour pouvoir livrer le temps en continu, doit varier au cours du temps : elle ne saurait, comme c'est le cas des atomes de césium pendant leur vol, rester dans un état stationnaire pendant son fonctionnement.

C'est pourquoi les atomes employés dans les horloges atomiques ordinaires ne se trouvent jamais dans un tel état d'énergie indépendant du temps, mais dans une superposition de tels états, qui dépend du temps. La différence de leurs énergies – et non pas l'énergie totale – divisée par la constante de Planck donne la fréquence à laquelle bat une horloge atomique. Jusqu'à présent, dans les meilleurs dispositifs de mesure du temps, les horloges atomiques optiques, cette fréquence est de l'ordre de celle des ondes lumineuses visibles (d'où le qualificatif « optique »).

Les chercheurs autour de Holger Müller et Steven Chu considèrent que tout corpuscule doté d'une masse peut être vu comme porteur d'une « horloge propre » par l'intermédiaire de sa fréquence de Compton. L'idée remonte au physicien français Louis de Broglie, l'inventeur en 1924 de la notion d'onde de matière. Il a relié l'équivalence masse-énergie découverte par Einstein à la vision de Planck selon laquelle à toute énergie peut être associée une fréquence. Il remarqua toutefois lui-même que son hypothèse conduisait à une contradiction : le processus périodique associé à un corpuscule en mouvement devait, à cause de la dilatation du temps – un effet relativiste –, apparaître ralenti. D'un autre côté, la fréquence devait aussi être plus élevée, car elle est proportionnelle à l'énergie du corpuscule, donc augmente avec son énergie cinétique. Broglie distinguait pour cette raison deux fréquences : celle d'un hypothétique « processus interne », caractérisé par la fréquence de Compton, et celle d'une onde de matière associée au mouvement de l'objet.

L'équation de Schrödinger développée deux ans après ces considérations a fourni la description mathématique générale de la propagation de cette onde de matière. De cette équation on déduit que dans le cas d'un atome isolé, un processus périodique n'est observable que quand cet atome se trouve dans une superposition d'états d'énergie bien déterminés (états propres). Les fréquences possibles d'un tel processus dépendent des différences entre les énergies de ces états propres. Cette propriété est au fondement des horloges atomiques modernes.

Il s'agit ici des fréquences liées à l'onde de matière. Et pour la « fréquence interne » ? N'a-t-elle aucune signification pratique, ou gagne-t-elle au cours de la propagation de la particule dans le champ gravitationnel une signification sur laquelle les théoriciens doivent encore s'accorder ?

À l'intersection de la théorie de la gravitation et de la théorie quantique apparaissent donc des questions conceptuelles concernant chacune des deux théories. Remarquons que nous n'avons jusqu'à présent eu affaire qu'à une situation physique relativement simple : un système quantique dans un champ gravitationnel classique. La prochaine étape logique consisterait à décrire ce champ et ses interactions avec un atome dans le cadre de la théorie quantique, au moins en partie. Des différences notables entre la gravitation et les autres interactions devraient se manifester. Toutes les tentatives faites jusqu'à présent pour formuler une théorie de la gravitation sont parties du principe que les règles quantiques habituelles s'appliquent à la gravitation. Or ces règles n'ont fait la preuve de leur efficacité qu'avec d'autres interactions, succès qui ne signifie pas que nous ayons vraiment compris leur physique profonde. Des expériences comme celle de l'interféromètre atomique pourraient fournir aux théoriciens des indices sur les liens entre la relativité générale et la théorie quantique, les deux piliers de la physique fondamentale d'aujourd'hui.

Ainsi, récemment, Xiao-Chun Duan, de l'université Sun Yat-sen, à Guangzhou, en Chine, et ses collègues ont comparé la chute de deux atomes de rubidium distincts par leur spin. Le déplacement des atomes, refroidis et placés dans une enceinte au vide poussé, était mesuré par interférométrie atomique. Ici, η est de l'ordre de $0,2 \times 10^{-7}$. L'état quantique n'a donc pas d'influence sur la gravité.

Plus longue sera la chute

À présent, les physiciens tentent d'améliorer la précision expérimentale en augmentant le temps de vol des atomes dans l'interféromètre. Le déphasage des ondes atomiques augmente en effet avec le carré du temps d'interrogation, tandis qu'il n'est que proportionnel au champ gravitationnel. Il serait possible d'augmenter ce temps de vol en réalisant par exemple l'expérience au cours d'une chute contrôlée dans une tour d'impesanteur, ou en embarquant le dispositif expérimental sur un satellite (c'est le projet *Microscope*). Il existe désormais un réel espoir de préciser quelles relations entretiennent la gravitation et la théorie quantique, et notamment d'envisager le principe d'équivalence d'Einstein d'un point de vue quantique. ■

articles

- **D. XIAO-CHUN *et al.*, Test of the universality of free fall with atoms in different spin orientations, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, 023001, 2016.**
- **D. SCHLIPPERT *et al.*, Quantum test of the universality of free fall, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 203002, 2014.**
- **S.-Y. LAN *et al.*, A clock directly linking time to a particle's mass, *Science*, vol. 339, pp. 554-557, 2013.**
- **P. WOLF *et al.*, Does an atom interferometer test the gravitational redshift at the Compton frequency ?, *Classical Quantum Gravity*, vol. 28, 145017, 2011.**
- **H. MÜLLER *et al.*, A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves, *Nature*, vol. 463, pp. 926-930, 2010.**
- **L. CACCIAPUOT et C. SALOMON, Space clocks and fundamental tests : the ACES experiment, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, vol. 127, p. 57, 2009.**



http://pariscosmo.in2p3.fr/fr

Créé par George Smoot à son arrivée à l'Université Paris Diderot en 2010, le PCCP favorise le développement de la cosmologie et de la gravitation à Paris :

- **Un programme de bourses postdoctorales**
- **Un soutien aux projets scientifiques**
- **Une série d'ateliers scientifiques internationaux**
- **La formation des enseignants**
- **Des activités en direction du grand public (en particulier le MOOC Gravité!)**

ENSEIGNER L'UNIVERS

Programme de formation des enseignants aux concepts de la physique de l'Univers avec George Smoot et des chercheurs du domaine de la cosmologie et de la gravitation



GRAVITÉ!

http://gravity.paris

Rejoignez la communauté Gravité! pour comprendre ce que sont les ondes gravitationnelles et suivre leur actualité. Embarquement immédiat pour l'exploration de l'Univers gravitationnel !

- un site web gravity.paris
- une Newsletter (inscription sur le site)
- un MOOC suivi par plus de 90 000 personnes

« Merci pour ce vertigineux voyage qui nous a permis d'entrevoir en quelques semaines la magie d'un univers qui répond à des lois somme toute assez «simples» mais qui révèle des phénomènes d'une dimension et d'une complexité sublimes. Passionnant! »

FONDATION PHYSIQUE DE L'UNIVERS

Une fondation pour soutenir les actions du PCCP dans le domaine de la recherche, de la formation et les interactions entre artistes et scientifiques.
> Voir «Les amis du PCCP » sur le site du PCCP

contact : verleure@apc.univ-paris7.fr

UnivEarthS USPC Université Sorbonne Paris Cité

PARIS DIDEROT

Pierre Binétruy

Pourquoi cherche-t-on une théorie quantique de la gravitation ?

■ Dans quelle mesure la théorie de la relativité générale est-elle validée par les expériences et les observations ?

Pierre Binétruy : La théorie d'Einstein est très bien validée. Elle a expliqué l'avance du périhélie de Mercure (rotation du grand axe de la trajectoire elliptique de cette planète), a prédit la déviation des rayons lumineux par le Soleil (dont la mise en évidence en 1919 a fait la célébrité d'Einstein), a prédit les ondes gravitationnelles, dont l'existence a été spectaculairement confirmée par la découverte faite par le détecteur LIGO en septembre 2015.

En particulier, le principe d'équivalence, sur lequel repose la théorie, a été vérifié avec une très grande précision : l'écart entre théorie et expérience est inférieur à 10^{-13} en valeur relative *(voir Le principe d'équivalence en question, par D. Giulini, page 88)*. Ce principe stipule que la masse inertielle (facteur de proportionnalité entre force et accélération) est équivalente à la masse gravitationnelle (grandeur à laquelle la force de gravité est proportionnelle).

Il a notamment pour conséquence le fait bien connu que, soumis à un même champ de gravité, tous les corps chutent avec la même accélération. Plus globalement, il implique une équivalence entre champ de gravité et champ d'accélération.

■ Il existe cependant des domaines où la relativité générale n'a pas été testée…

Pierre Binétruy : En effet, jusqu'à récemment la théorie n'avait été testée que dans des situations où l'intensité de la gravitation était faible, ce qui est le cas dans le Système Solaire ou dans un contexte cosmologique. Mais tout a changé avec la découverte directe des ondes gravitationnelles : l'événement observé, la fusion de deux trous noirs, doit être calculé en régime de champ gravitationnel fort ; notamment parce que les deux trous noirs atteignent des vitesses proches de la vitesse de la lumière. Le fait que le signal observé coïncide exactement avec le signal prédit est la première confirmation que la gravité en champ fort est bien décrite par la théorie d'Einstein. Un vrai tour de force : cette théorie a été conçue il y a plus de 100 ans, quand on n'imaginait même pas l'existence d'objets comme les trous noirs !

La relativité générale n'a pas non plus été testée dans le domaine microscopique : les mesures de forces gravitationnelles à cette échelle sont très difficiles, car d'autres forces ou effets, notamment l'effet Casimir, dû aux fluctuations quantiques du vide, viennent brouiller les effets gravitationnels dès que l'on rapproche trop deux corps. C'est pourquoi la gravitation n'a été mesurée jusqu'à aujourd'hui qu'à des échelles supérieures au micromètre.

■ La cohérence interne, mathématique, de la relativité générale est-elle établie ?

Pierre Binétruy : Oui, c'est une théorie très cohérente. Qui plus est, à chaque fois qu'on essaie de modifier ne serait-ce que légèrement la relativité générale, des incohérences apparaissent, des instabilités intrinsèques par exemple. De ce point de vue, on a l'impression que la relativité générale est une théorie un peu particulière, une sorte d'îlot solitaire dans une mer de théories incohérentes.

D'un autre côté, certaines solutions des équations d'Einstein (équations qui relient la répartition de matière et d'énergie à la géométrie de l'espace-temps) présentent des singularités, c'est-à-dire des points de l'espace-temps où certaines grandeurs physiques sont infinies. De telles singularités ne pouvant pas correspondre à une réalité physique, on peut les interpréter comme une incohérence de la théorie. Mais l'apparition de singularités est probablement liée au fait que la relativité générale y atteint sa limite de validité, et que les aspects quantiques doivent, au moins dans ces régions de l'espace-temps, être pris en compte.

■ Existe-t-il aujourd'hui des théories classiques, c'est-à-dire non quantiques, pouvant être des alternatives à la relativité générale ?

Pierre Binétruy : Il n'en existe pas de vraiment satisfaisantes. On a tenté d'en



» Bio express

1981 **Soutien sa thèse au CERN.**

1990 **Nommé professeur à l'université Paris 11, Orsay.**

1997 **Dirige le groupement de recherche européen *Supersymétrie* jusqu'en 2004.**

2003 **Rejoint l'université Paris Diderot et crée le Laboratoire Astroparticule et Cosmologie.**

2015 **Publie *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, chez Dunod.**

construire pour expliquer certains aspects gravitationnels encore énigmatiques, notamment la question de la « matière noire », invoquée pour expliquer la dynamique des galaxies. L'existence de la matière noire pourrait être une hypothèse inutile si la force de gravitation était différente de celle indiquée par la relativité générale aux grandes échelles cosmiques. Mais il est très difficile de modifier la force de gravitation, ou d'ajouter l'intervention d'une cinquième force fondamentale, de façon cohérente aux différentes échelles : galaxies, amas de galaxies, etc. Aucune théorie alternative ne semble rendre compte de toutes les échelles à la fois, en raison de fortes contraintes à respecter, notamment le principe d'équivalence. Et c'est la même chose avec la question de l'« énergie sombre », qui serait responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

C'est pourquoi le schéma privilégié actuellement est de s'appuyer sur la relativité générale (avec une constante cosmologique dans les équations d'Einstein pour rendre compte de l'accélération de l'expansion) et sur l'hypothèse de l'existence de la matière noire.

■ Puisque, en l'état actuel des connaissances, la relativité générale semble décrire correctement la gravitation, pourquoi en cherche-t-on une théorie quantique ?

Pierre Binétruy : Peut-être la gravité est-elle irréductiblement de nature classique. Mais plusieurs arguments indiquent qu'une théorie quantique de la gravitation est nécessaire. Il y a d'abord les singularités, que la relativité générale fait apparaître au centre des trous noirs ou à l'origine du Big Bang. Ces singularités soulèvent des questions sur la structure de l'espace-temps à l'échelle de Planck, une échelle naturelle (de l'ordre de 10^{-35} mètre) construite en combinant les trois constantes fondamentales (G, c et h) de la relativité générale et de la physique quantique *(voir Le principe d'équivalence en question, par D. Giulini, page 88)*. À cette échelle, la gravité devient aussi intense que les autres forces fondamentales qui relèvent, elles, de la théorie quantique.

Celle-ci décrit un monde où la matière est discontinue ; peut-être en est-il de même de l'espace-temps *(voir L'Univers est-il pointilliste ?, par D. Tong, page 72)* ? La relativité générale décrit un espace-temps dynamique, en interaction avec la matière et l'énergie, alors qu'en physique quantique, l'espace-temps n'est qu'un cadre passif où se déroulent les phénomènes : ces deux visions semblent contradictoires et sont à concilier. Cela pourrait d'ailleurs avoir des conséquences sur la théorie quantique elle-même.

■ Pourquoi les tentatives de construire une théorie quantique de la gravitation à partir de la relativité générale ont-elles échoué ?

Pierre Binétruy : Le procédé mathématique habituel que l'on utilise pour passer d'une théorie classique à son équivalent quantique ne fonctionne pas avec la relativité générale. On démontre que la version quantique de celle-ci est « non renormalisable », c'est-à-dire que des quantités infinies apparaissent dans les calculs des grandeurs mesurables et qu'il est impossible de les éliminer. Ce n'est par exemple pas le cas de l'électrodynamique quantique, la version quantique de l'électromagnétisme classique. Ici aussi, des infinis apparaissent dans les calculs, mais on peut les éliminer de façon systématique, par une procédure formelle consistant à redéfinir les paramètres de la théorie (en l'occurrence la masse et la charge de l'électron) de façon à retrouver leurs valeurs observées. La renormalisation est impossible dans la version quantique

de la relativité générale, ce qui enlève à cet édifice toute signification physique.

Quelles sont aujourd'hui les pistes explorées pour construire une théorie quantique de la gravitation ?

Pierre Binétruy : Il existe deux approches. L'une consiste à « quantifier » la gravitation en oubliant les trois autres interactions fondamentales, au moins dans un premier temps. C'est ce que les spécialistes nomment des théories de la « gravité quantique ».

Cette approche est représentée en particulier par la « gravitation quantique à boucles », une théorie encore largement en chantier. Elle part d'une formulation mathématique particulière de la relativité générale (la formulation dite hamiltonienne), et le passage à la version quantique exige au préalable la détermination de certains couples de variables appropriées.

Dans ce schéma, on obtient un espace-temps granulaire, discrétisé. Bien qu'inachevée, la théorie de la gravitation à boucles serait parvenue à quelques résultats intéressants, notamment l'expression de l'entropie (une grandeur thermodynamique) d'un trou noir en fonction de l'aire de son horizon des événements.

L'autre approche pour aboutir à une théorie quantique de la gravitation consiste à aborder de front l'unification des quatre interactions fondamentales. Cette approche est représentée par la théorie des cordes dans un monde à plus de quatre dimensions (trois d'espace, une de temps), où les dimensions supplémentaires seraient imperceptibles car minuscules et refermées sur elles-mêmes.

En quoi consiste la théorie des cordes ?

Pierre Binétruy : L'idée initiale provient de l'étude, dans les années 1970, de l'interaction forte de deux quarks. Elle est réapparue dans les années 1980 dans le contexte d'une théorie plus globale, qui considère que les objets fondamentaux de la physique ne sont pas des particules ponctuelles, mais des objets unidimensionnels, de minuscules cordes dont les différents modes de vibration correspondraient aux diverses particules observées. Cette théorie n'a qu'un seul paramètre, qui correspond en quelque sorte à la longueur minimale des cordes. Mais pour des raisons de cohérence interne, elle nécessite un nombre de dimensions spatiotemporelles supérieur à 4. On a pensé un moment que la théorie n'était cohérente qu'à 11 ou 26 dimensions, mais d'autres possibilités se sont révélées depuis.



« La théorie des cordes a suscité l'engouement des physiciens parce qu'elle semblait constituer un cadre permettant d'unifier les quatre interactions fondamentales »

Pourquoi la théorie des cordes a-t-elle suscité l'engouement des physiciens ?

Pierre Binétruy : Parce qu'elle semblait constituer un cadre permettant d'unifier les quatre interactions fondamentales. En particulier, elle présente de façon naturelle deux propriétés très séduisantes.

D'une part, elle prévoit l'existence de particules de masse nulle et de spin (moment cinétique intrinsèque) égal à 2, c'est-à-dire de gravitons véhiculant la force gravitationnelle. D'autre part, elle est supersymétrique, c'est-à-dire qu'elle a une symétrie faisant correspondre aux particules de spin entier des particules de spin demi-entier, et inversement.

Or la supersymétrie était un ingrédient clé des tentatives précédentes d'unification des interactions.

Où en est aujourd'hui cette théorie ?

Pierre Binétruy : L'espoir d'une théorie des cordes unique, avec des prédictions univoques, a fait long feu. Autre inconvénient sérieux : les théories des cordes ont du mal à expliquer l'inflation (l'expansion brutale de l'Univers à son tout début) et l'accélération actuelle de l'expansion cosmique. Il y a eu quelques succès, par exemple le calcul de l'entropie de certains trous noirs à partir de leurs degrés de liberté microscopiques.

Mais la théorie des cordes constitue peut-être plus un puissant outil d'analyse qu'une théorie du tout. Elle a ainsi permis de conjecturer une dualité entre la gravité quantique et des théories semblables à celles décrivant les particules élémentaires. Cette dualité (la « correspondance AdS/CFT » qui est une conjecture reliant deux types de théories) permet d'effectuer des calculs que l'on ne savait pas faire auparavant, et semble être un principe profond qui dépasse le cadre de la théorie des cordes.

Sur le plan expérimental ou observationnel, quelles sont les perspectives pour aller au-delà de la relativité générale ?

Pierre Binétruy : La détection d'ondes gravitationnelles par les détecteurs *Advanced* LIGO et *Advanced Virgo* *(voir Les premières ondes gravitationnelles, par L. Krauss, page 80)* nous offrira des moyens inédits pour tester les processus physiques qui opèrent tout près de l'horizon des trous noirs. Stephen Hawking nous a appris que des phénomènes quantiques y jouent un rôle : c'est le fameux rayonnement de Hawking, qu'il sera difficile d'identifier, mais des surprises restent possibles.

Pour obtenir des mesures de précision, il faudra probablement attendre l'observatoire spatial *LISA* vers 2030. La mission technique *LISA Pathfinder* qui le prépare a été lancée en décembre 2015 et vient de publier des premiers résultats spectaculaires. Cela est de bon augure pour la future mission. *LISA* devrait permettre d'étudier avec précision l'horizon de deux trous noirs superlatifs en coalescence, et de tester ainsi avec une précision inégalée la théorie de la gravitation. ■

Propos recueillis par Maurice Mashaal

La gravitation **quantique** en 2D

À quoi ressemblerait la gravitation dans un espace à deux dimensions plutôt que trois ? L'exploration de cette idée guide les physiciens vers une unification de la gravitation et de la physique quantique.

Steven CARLIP
est professeur à l'université de Californie à Davis (États-Unis).

La physique a toujours été en quête d'unité. Newton a montré que la force responsable de la chute d'une pomme est aussi celle qui maintient les planètes sur leur orbite. Maxwell a rassemblé les descriptions de l'électricité, du magnétisme et de la lumière en une théorie unique, l'électromagnétisme. Un siècle plus tard, les physiciens y ajoutaient l'interaction faible pour créer la théorie unifiée dite électrofaible. Einstein, quant à lui, réunissait au début du XXe siècle l'espace et le temps en un unique continuum, l'espace-temps.

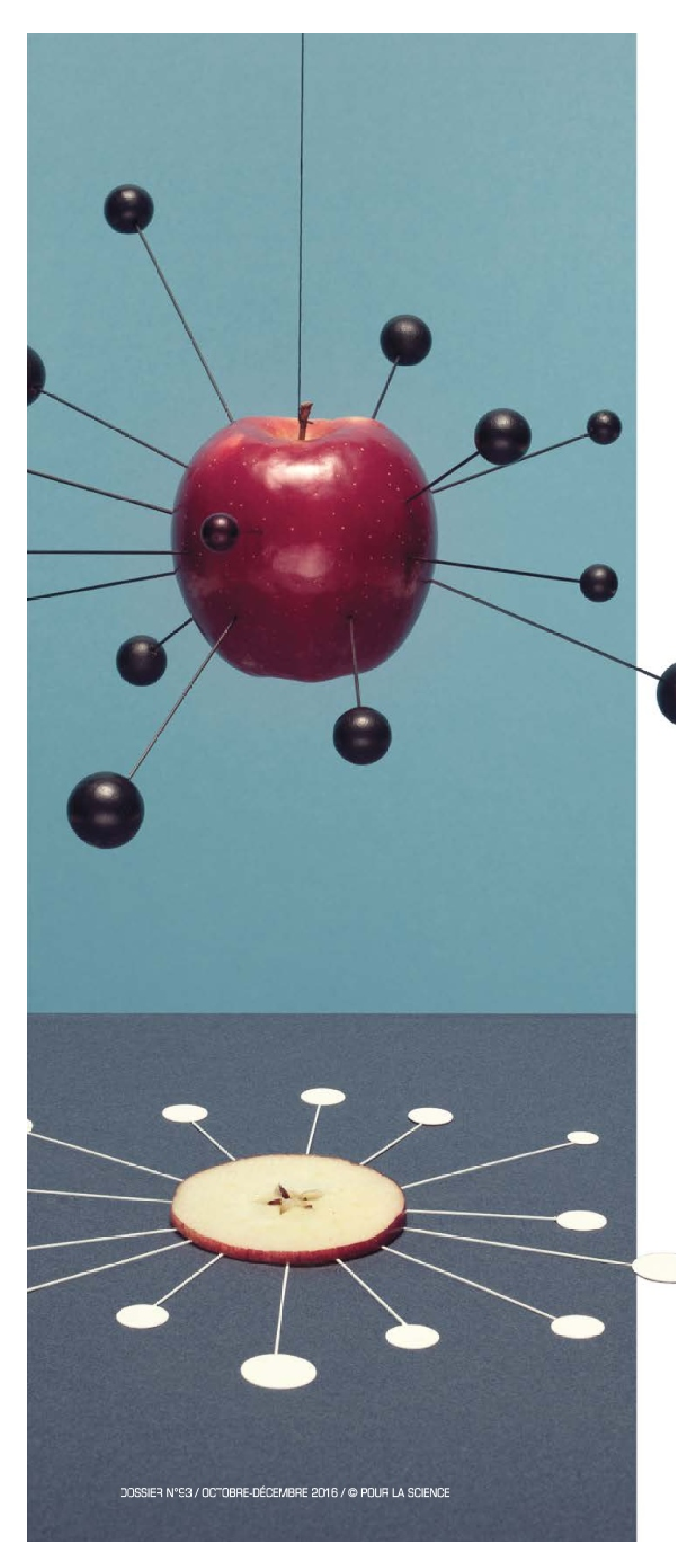
Aujourd'hui, le principal chaînon manquant dans cette quête unificatrice est la réunion de la gravitation et de la physique quantique. La théorie de la gravitation d'Einstein, la relativité générale, décrit aussi bien l'évolution de l'Univers que les mouvements des planètes et la chute des pommes. La physique quantique décrit les atomes, les électrons et les quarks, les interactions fondamentales subatomiques, et bien d'autres phénomènes. Mais là où les deux théories devraient s'appliquer ensemble, dans les situations extrêmes où les effets quantiques et ceux de la gravitation sont importants, par exemple au cœur des trous noirs ou durant les premières fractions de seconde de l'Univers, elles semblent incompatibles. En dépit de tous leurs efforts depuis plus de quatre-vingts ans pour combiner la relativité générale et la physique quantique, les physiciens n'ont pas encore réussi. La théorie de la gravitation quantique nous échappe encore.

Un physicien face à une question trop difficile a souvent le réflexe de simplifier le problème. De fait, la physique progresse par l'étude de modèles simples qui capturent certains éléments d'une réalité complexe. Les chercheurs ont ainsi travaillé sur de nombreux modèles restreints de la gravitation quantique, par exemple des approximations valables lorsque la

L'ESSENTIEL

- **Tenus en échec par l'unification de la physique quantique et de la théorie de la relativité générale, les physiciens ont étudié une version simplifiée du problème où l'univers n'a que deux dimensions.**
- **Bien que les ondes gravitationnelles ne puissent exister en deux dimensions, un tel univers peut néanmoins changer de forme globale sous l'effet de la gravitation.**
- **La théorie quantique de la gravitation qui en découle éclaire diverses énigmes des théories d'unification, telles que la façon dont le temps émerge d'une toile de fond atemporelle ou le rayonnement des trous noirs.**

© Kyle Bean



gravitation est faible, ou sur des cas particuliers tels que les trous noirs. Une autre approche consiste à négliger une dimension de l'espace et à étudier comment la gravitation s'exerce alors. On parle d'approche 2 + 1 dimensionnelle, pour deux dimensions spatiales et une dimension temporelle. Les principes qui gouvernent la gravitation dans cet univers simplifié pourraient éclairer notre Univers tridimensionnel (3 + 1) et livrer de précieux indices pour l'unification.

Bienvenue à *Flatland*

L'idée d'oublier une dimension a déjà connu son heure de gloire. Le roman *Flatland*, publié en 1884 par Edwin Abbott, dépeint les aventures d'un carré, habitant d'un « monde plat », à deux dimensions, peuplé de triangles, de carrés et autres figures géométriques. Bien que ce roman se voulût en fait une satire de la société victorienne, il a aussi déclenché une vague d'intérêt pour la géométrie dans diverses dimensions et a toujours du succès à l'heure actuelle auprès des mathématiciens et des physiciens.

Les premières études de la gravitation dans un monde à deux dimensions, dans les années 1960, furent décevantes. L'espace plan semblait être dépourvu de gravitation, car cette interaction – plus précisément les ondes gravitationnelles – n'a littéralement pas assez d'espace pour se propager. À la fin des années 1980, cependant, le sujet renaît quand les chercheurs s'aperçoivent que la gravitation fonctionne d'une façon inattendue dans un espace à deux dimensions. Certes, deux masses ne s'attirent pas selon la loi de Newton (avec une force proportionnelle à l'inverse du carré de la distance), mais la gravitation joue néanmoins sur la forme générale de l'espace et pourrait même y engendrer des trous noirs. Récemment, la gravitation en deux dimensions a apporté un éclairage sur certains concepts fondamentaux de la gravitation quantique, tels que le principe holographique ou la question de l'émergence du temps à partir d'un cadre atemporel.

Afin de développer une théorie quantique pour une interaction donnée, les physiciens partent en général de la théorie classique correspondante, et tentent de la réécrire en appliquant les principes quantiques. Pour la gravitation, le point de départ est la relativité générale. Et les ennuis commencent.

Selon la relativité générale, la gravitation n'est pas une force, mais une manifestation de la géométrie de l'espace-temps lui-même. La Terre tourne autour du Soleil non pas parce qu'une force s'exerce sur elle, mais parce qu'elle se déplace en suivant le chemin le plus court dans l'espace-temps, qui est courbé par la masse

CE QUI CHANGE AVEC UNE GRAVITATION EN 2D

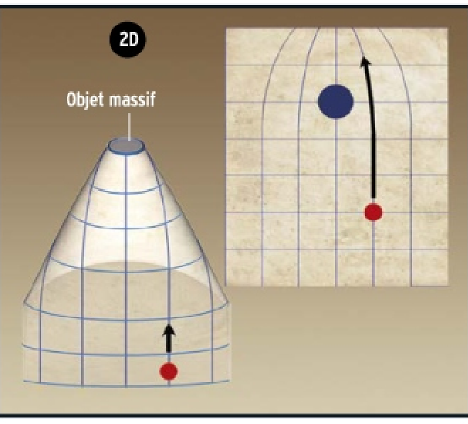
Si l'on aplatissait un espace tridimensionnel pour le réduire à deux dimensions, les objets deviendraient plats, mais ce n'est pas tout. La force de gravitation, notamment, aurait un comportement complètement différent. Imaginer comment fonctionnerait la gravitation en deux dimensions est une étape utile pour élaborer une théorie quantique de la gravitation, qui réconcilierait la théorie de la relativité générale d'Einstein avec la physique quantique.

UNE ATTRACTION DIFFÉRENTE

Un objet massif courbe l'espace. En trois dimensions, cette distorsion se traduit par l'attraction de deux objets comme le décrit la loi de l'attraction universelle de Newton.

En deux dimensions, un objet massif déforme l'espace en lui imprimant une forme conique. Les trajectoires des objets sont toujours déviées, mais selon une loi qui n'est plus celle de Newton.

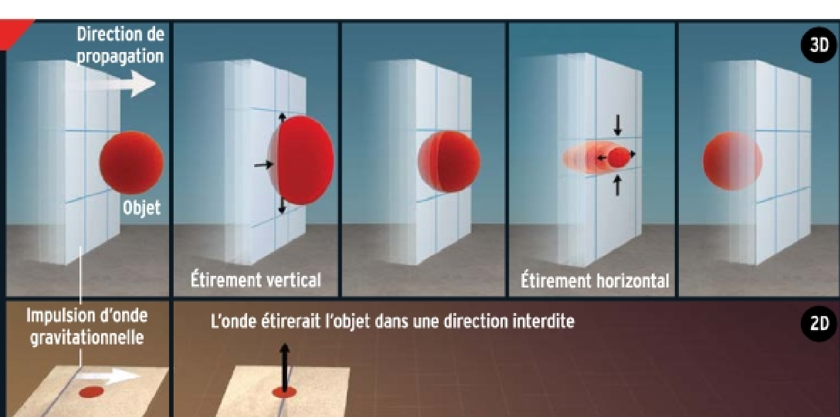




LES ONDES IMPOSSIBLES

D'après la relativité générale, les variations du champ gravitationnel se propagent sous la forme d'ondes gravitationnelles, qui sont fondamentalement tridimensionnelles : elles étirent périodiquement les objets dans les deux directions perpendiculaires à l'axe de propagation *(en haut)*.

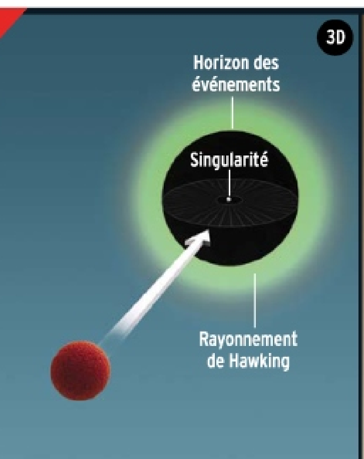
Elles ne peuvent se propager en deux dimensions *(en bas)*. Or sans ondes gravitationnelles, on ne sait pas quantifier la gravitation.

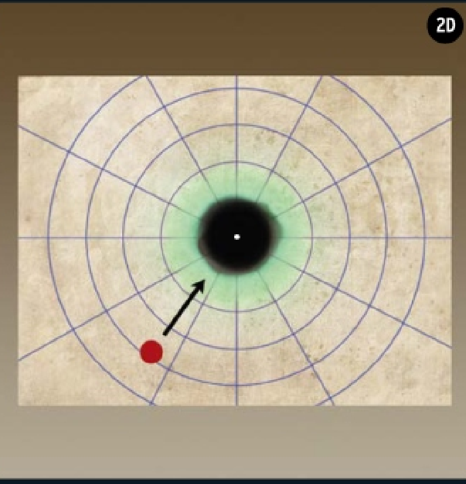


DES TROUS NOIRS EXISTENT

Les trous noirs sont des régions où les objets peuvent pénétrer, mais dont ils ne peuvent sortir en raison de l'attraction gravitationnelle intense de l'objet central.

L'une des découvertes les plus surprenantes de la théorie de la gravitation en deux dimensions est que des trous noirs peuvent exister dans l'espace bidimensionnel à condition que l'espace contienne de l'énergie sombre. En raison d'effets quantiques, les trous noirs, en 3D et en 2D, émettent un faible rayonnement thermique de Hawking.





du Soleil. Unifier la mécanique quantique et la gravitation signifie ainsi quantifier la structure même de l'espace-temps, et pas simplement une interaction.

Pourquoi est-ce difficile ? L'une des pierres angulaires de la physique quantique est le principe d'incertitude de Heisenberg. Selon ce principe, les quantités physiques fluctuent de façon aléatoire et ne peuvent pas être mesurées avec une précision infinie toutes en même temps. Dans une théorie quantique de la gravitation, l'espace et le temps eux-mêmes fluctuent, ce qui ébranle tout l'échafaudage de la physique classique : nous ne savons pas donner un sens précis à l'espace-temps quantique.

Un problème de temps

Ces obstacles à la définition d'un espace-temps quantifié se manifestent de plusieurs façons. L'une d'entre elles est le « problème du temps ». Le temps est fondamental dans la réalité que nous observons. Presque toutes les théories physiques sont *in fine* une description de la façon dont certaines grandeurs varient au cours du temps. Il importe donc de savoir précisément ce que signifie le concept de « temps ». Mais nous ne le savons pas.

Pour Newton, le temps était absolu, hors de la nature. Les formulations habituelles de la mécanique quantique intègrent cette idée d'un temps absolu. Les théories de la relativité restreinte puis générale, en revanche, ont détrôné le temps absolu. Ainsi, le rythme d'une horloge est plus lent dans un champ gravitationnel intense. Dans la théorie de la relativité, le temps n'est plus un simple paramètre externe, mais une composante dynamique de l'espace-temps.

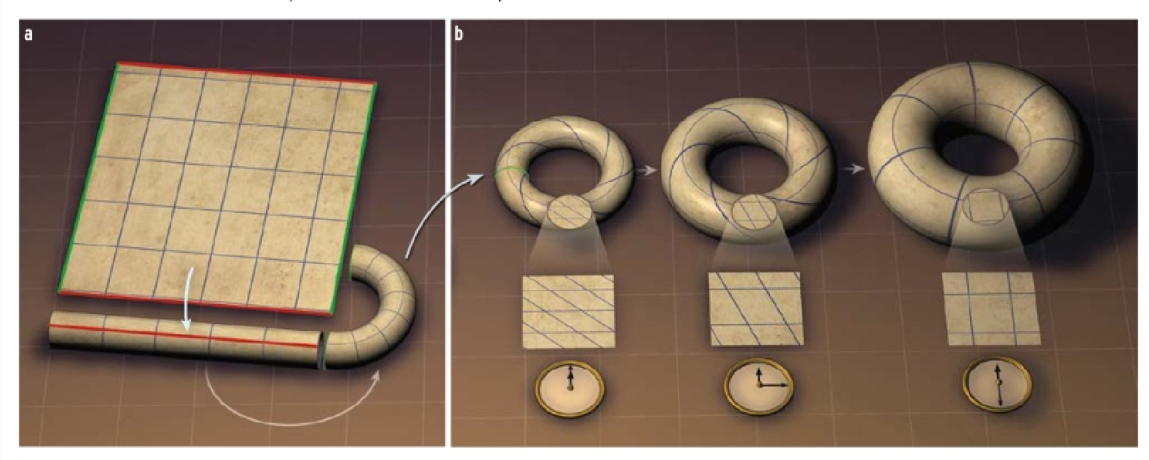
Cependant, s'il n'y a pas d'horloge idéale universelle, existant « en dehors » de la réalité matérielle, l'écoulement apparent du temps doit émerger de la structure même de l'Univers. Mais comment ? On l'ignore...

Le problème du temps a un cousin moins célèbre : le problème des observables. La physique est une science empirique. Une théorie doit faire des prédictions testables sur des quantités observables. En physique classique, ces quantités sont affectées à des positions spécifiques qui sont étiquetées avec des coordonnées, et les théories prédisent comment les observables dépendent des valeurs de ces coordonnées spatiales et du temps.

Or d'après la théorie de la relativité, les coordonnées spatiales sont des étiquettes artificielles et arbitraires, et il n'existe pas de repère absolu. Mais comment prétendre savoir ce qui se passe en un point de l'espace que l'on ne sait pas identifier objectivement ? On sait qu'une théorie quantique de la gravitation ne peut pas avoir d'observables purement locales, c'est-à-dire des observables dont les valeurs dépendent d'un seul point de l'espace-temps. Les scientifiques en quête d'une telle théorie doivent composer avec des observables non locales, dont la valeur dépend de plusieurs points en même temps (c'est notamment le cas des systèmes quantiques intriqués). De façon

QUANTIFIER LA GRAVITATION EN DEUX DIMENSIONS

En deux dimensions, la gravitation ne peut pas se propager. Contrairement à la situation tridimensionnelle, elle ne modifie pas la courbure de l'espace, mais modifie sa forme globale. Les physiciens ont étudié un modèle d'univers torique, obtenu par exemple en recollant les côtés opposés d'un carré du plan deux à deux *(a)*. L'univers torique évolue au fil du temps sous l'influence de la gravitation en des tores de tailles et de proportions différentes *(b)*, ces changements se traduisant par la variation d'une grandeur nommée module. Ce qui se passe dans chaque petite région de l'espace (zooms) reflète l'état global de l'espace. Dans ce modèle, le microcosme et le macrocosme sont inextricablement liés.



générale, on ne sait pas comment définir de tels objets, et encore moins les utiliser pour décrire le monde que nous observons.

Un troisième problème est celui de la naissance de l'Univers. A-t-il surgi à partir de rien ? Décrit-il un cycle éternel de périodes d'expansion suivies d'effondrements ? Est-ce une bulle en expansion au sein d'un univers parent ? Chaque possibilité pose un problème différent pour une théorie quantique de la gravitation.

Enfin, toute une série de questions concernent les trous noirs, objets parmi les plus mystérieux. Ces astres extrêmes offrent une fenêtre sans équivalent sur la nature ultime de l'espace et du temps. Au début des années 1970, le Britannique Stephen Hawking a montré que les trous noirs ne sont pas totalement noirs. Ils doivent émettre un rayonnement similaire à celui d'un corps noir, c'est-à-dire le rayonnement de tout objet porté à une certaine température. La température reflète habituellement le comportement sous-jacent des composants microscopiques d'un système. Dire qu'une pièce est chaude, c'est dire que les molécules d'air qui la remplissent sont agitées. Dans le cas d'un trou noir, la nature de ces composants microscopiques susceptibles de prendre différents états reste inconnue. Appelés « degrés de liberté », ils devraient être décrits dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation.

De prime abord, l'espace à deux dimensions semble peu prometteur pour chercher des réponses à ces questions. En 1963, le physicien polonais Andrzej Staruszkiewicz a déterminé une loi de la gravitation en deux dimensions en appliquant la relativité générale. Alors qu'en trois dimensions, la présence d'un objet massif courbe doucement l'espace-temps, en deux dimensions, elle tord l'espace pour former un « cône » centré sur l'objet, comme un « cornet de frites » fait d'une feuille de papier enroulée *(voir l'encadré page 103)*. Un petit objet qui passe près du sommet du cône voit sa trajectoire défléchie, de la même façon que le Soleil courbe la trajectoire d'une comète. En 1984, le Néerlandais Gerard't Hooft et les Américains Stanley Deser et Roman Jackiw ont déterminé comment des particules quantiques (c'est-à-dire représentées par des fonctions d'onde) se déplaceraient dans un tel espace.

La déformation de l'espace bidimensionnel qu'induit la gravitation est beaucoup plus simple que le motif complexe de courbure qu'elle crée dans notre Univers : la géométrie du cône reste essentiellement plane. En conséquence, il n'y a pas d'équivalent de la loi de l'attraction newtonienne. Deux corps initialement immobiles l'un à côté de l'autre ne « tomberont » pas l'un vers l'autre.

Un modèle trop simpliste ?

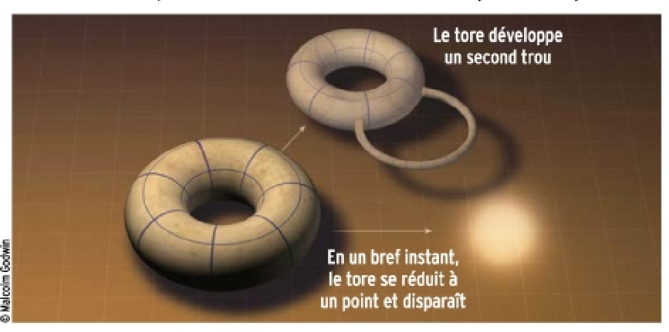
Cette simplicité est séduisante, et laisse penser que quantifier la gravitation à deux dimensions est plus facile que quantifier la relativité générale complète en trois dimensions d'espace. Malheureusement, ce serait trop simple : la théorie d'Andrzej Staruszkiewicz n'a pas assez de degrés de liberté pour être quantifiée. Un espace à deux dimensions ne laisse aucune place aux ondes gravitationnelles, un élément important de la théorie d'Einstein.

Considérons le cas plus simple de l'électromagnétisme. Les champs électriques et magnétiques sont produits par des charges et des courants électriques. James Clerk Maxwell a montré que les variations de ces champs se propagent librement sous forme d'ondes électromagnétiques. Dans la version quantique de la théorie de Maxwell, l'énergie de ces ondes est véhiculée par des quanta, les photons, particules qui transmettent l'interaction électromagnétique. De même, les variations du champ gravitationnel de la relativité générale se propagent sous forme d'ondes gravitationnelles, et une théorie quantique de la gravitation devrait associer à ces ondes des particules nommées gravitons, médiatrices de l'interaction gravitationnelle.

Mais les ondes gravitationnelles sont fondamentalement tridimensionnelles : le champ varie périodiquement dans deux directions perpendiculaires à la direction du mouvement *(voir l'encadré page 102)*. Or dans un espace à deux dimensions, il n'y a pas de place pour un tel comportement. Une fois que la direction du mouvement est fixée, il ne reste qu'une dimension perpendiculaire. Les ondes gravitationnelles et leurs gravitons ne peuvent tout simplement pas être contenus dans deux dimensions spatiales.

TROUS DE VER ET AUTRE BIZARRERIES

Dans l'une des formulations de la gravitation quantique à deux dimensions, contrairement à ce qui se passe en théorie de la relativité générale, la topologie de l'Univers peut changer. Cela pourrait résoudre des questions posées de longue date. Par exemple, un tore à un seul trou a une probabilité non nulle d'évoluer vers un tore doté d'une anse, c'est-à-dire à deux trous. Cela reviendrait à créer un trou de ver, un passage direct d'un endroit à un autre. L'Univers pourrait aussi subitement devenir un point et disparaître.



Malgré quelques ponctuels regains d'intérêt, la théorie d'Andrzej Staruszkiewicz était donc restée sans suite. Jusqu'à ce qu'en 1989, Edward Witten, de l'Institut d'études avancées de Princeton, apporte une contribution décisive. Il travaillait sur une classe particulière de champs où les ondes ne se propagent pas librement. Lorsqu'il s'est rendu compte que la gravitation en deux dimensions appartenait à cette classe, il a ajouté un ingrédient crucial : la topologie.

Edward Witten a fait remarquer que même si la gravitation ne peut pas se propager sous forme d'ondes, elle peut avoir un effet sur la forme générale de l'espace, ce que les mathématiciens appellent sa topologie. La topologie décrit les caractéristiques générales d'une surface, comme le nombre de trous. Deux surfaces ont la même topologie quand on peut passer de l'une à l'autre par une déformation continue, sans rien couper, déchirer ou coller. Un hémisphère et un disque ont par exemple la même topologie ; il suffit d'étaler le premier pour obtenir le second. Une chambre à air, ou tore, a une autre topologie, identique à celle d'une tasse munie d'une anse.

Un espace en chambre à air

Bien que les tores apparaissent courbes vus de l'extérieur, ils sont plats du point de vue de leur géométrie interne. Ce qui caractérise un tore, c'est qu'on peut décrire une courbe fermée dans deux directions indépendantes, l'une entourant le trou et l'autre perpendiculaire. En fait, il existe une famille infinie de tores, caractérisés par un paramètre nommé module. Lié au rapport entre les tailles des deux cercles qui définissent le tore, il donne une mesure de la « forme » du tore (plus ou moins épais, avec un trou plus ou moins large, etc.).

Dans un univers à deux dimensions en forme de tore, la gravitation crée une dynamique qui fait évoluer le module, c'est-à-dire la géométrie globale du tore, au fil du temps *(voir l'encadré page 103)*. Edward Witten a montré que ce processus peut être quantifié, c'est-à-dire qu'on peut transformer la théorie classique de la gravitation en deux dimensions en une théorie quantique.

Ainsi, la gravitation quantique à deux dimensions n'est pas une théorie des gravitons, mais une théorie de l'évolution de la forme globale des tores. Cette vision diffère de la représentation habituelle de la théorie quantique comme une description de l'infiniment petit. La gravitation quantique en deux dimensions est, en fait, une théorie qui porte sur l'Univers dans son ensemble en tant qu'objet contrôlé par les lois quantiques. Ce point de vue livre un modèle suffisamment riche pour explorer certains des problèmes conceptuels fondamentaux de la gravitation quantique.

La gravitation en deux dimensions indique par exemple comment le temps pourrait émerger d'un cadre fondamentalement atemporel. Dans l'une des formulations de la théorie, l'univers entier est décrit par une unique fonction d'onde quantique. Mais cette fonction d'onde ne dépend pas explicitement du temps. En effet, le temps, lié à l'espace, est partie prenante de la géométrie et est donc inclus dans la quantification. Il n'est pas un paramètre indépendant.

La gravitation quantique en deux dimensions est, en fait, une théorie qui porte sur l'Univers dans son ensemble en tant qu'objet contrôlé par les lois quantiques.

D'une façon ou d'une autre, cette fonction d'onde « atemporelle » fait émerger le flux du temps tel que nous l'observons. Selon l'aphorisme d'Einstein, le temps est ce qui est mesuré par une horloge. Derrière l'apparente banalité, cela signifie qu'il n'existe pas de temps absolu déconnecté de la réalité physique. Le temps est toujours déterminé par un sous-système qui est corrélé avec le reste de l'Univers, par exemple le mouvement de rotation de la Terre ou la fréquence d'un rayonnement de l'atome de césium.

La théorie offre différentes options en matière d'horloge – en fait, l'évolution de toute grandeur observable – et le choix définit ce que signifie le « temps ». Une fois ce choix fait, toutes les autres observables physiques changent en fonction du temps de cette horloge. Dans le tore-univers, le module est par exemple corrélé avec la taille du tore, et un habitant perçoit son évolution comme une évolution de la taille de l'univers au fil du temps. La théorie introduit donc le temps à partir d'un univers atemporel. Ces idées ne sont pas nouvelles, ni spécifiques à la gravitation en deux dimensions, mais ce modèle fournit un cadre dans lequel on peut faire des calculs et vérifier la validité de cette approche.

Quant au problème des observables, l'espace toroïdal offre une quantité mesurable, à savoir le module. C'est une observable non locale : elle ne prend pas de valeurs en des points précis, mais décrit la structure de l'espace entier. Tout ce qu'on peut mesurer de l'intérieur de l'espace à deux dimensions, c'est en fin de compte par son intermédiaire. En 2008, Catherine Meusburger, maintenant à l'université d'Erlangen-Nuremberg, en Allemagne, a par exemple montré comment le module est lié à des mesures cosmologiques concrètes telles que le décalage vers le rouge de rayons lumineux. J'ai pour ma part montré qu'il est lié au mouvement des objets.

Enfin, la gravitation à deux dimensions réserve une bonne nouvelle aux partisans des trous de vers, ces hypothétiques raccourcis entre deux points distants de l'Univers. Il existe au moins une formulation de la théorie qui autorise la topologie de l'espace à changer sous l'effet de la gravitation. Un espace torique pourrait par exemple développer une anse et devenir un tore à deux trous, ce qui revient à créer un passage entre deux régions *(voir la figure page 104)*. Dans certaines versions de la gravitation quantique à deux dimensions, on peut même décrire la création de l'Univers à partir de rien, en d'autres termes le changement ultime de topologie.

Des trous noirs en 2D

La gravitation étant limitée dans l'espace à deux dimensions, tous les spécialistes pensaient que les trous noirs ne pouvaient pas y exister. Et pourtant, en 1992, trois physiciens chiliens, Máximo Bañados, Claudio Teitelboim et Jorge Zanelli, ont montré que cette théorie autorise en fait l'existence de trous noirs, à condition que l'univers contienne une certaine forme d'énergie comparable à l'énergie sombre, qui dans notre Univers s'oppose à l'effet de la gravitation.

Un trou noir BTZ (les initiales des trois chercheurs) ressemble assez à un vrai trou noir de notre Univers. Formé par l'effondrement de matière sous son propre poids, il est entouré d'un horizon des événements, une frontière virtuelle d'où rien ne peut s'échapper. Conformément aux calculs de Stephen Hawking, un trou noir BTZ devrait émettre un rayonnement correspondant à une température qui dépend de sa masse et de sa vitesse de rotation.

Ce résultat est une énigme. Dépourvue d'ondes gravitationnelles ou de gravitons, la gravitation en deux dimensions est aussi dénuée des degrés de liberté gravitationnels qui permettraient d'expliquer la température et d'autres grandeurs thermodynamiques des trous noirs. Et pourtant, ils se manifestent quand même.

C'est en fait l'horizon des événements qui apporte une structure supplémentaire faisant défaut à l'espace bidimensionnel vide. L'horizon est topologiquement équivalent à un cercle, ce qui enrichit la théorie de degrés de liberté supplémentaires : les vibrations de ce cercle. De façon remarquable, leurs propriétés correspondent exactement aux résultats de Hawking.

Comme les degrés de liberté sont des caractéristiques de l'horizon, on peut dire en un sens qu'ils résident au « bord » de l'espace à deux dimensions. Ils constituent donc une réalisation d'un des principes les plus subtils de la gravitation quantique, le principe holographique. Tout comme un hologramme enregistre une image tridimensionnelle sur une pellicule à deux dimensions, ce principe énonce que la physique d'un univers à n dimensions peut être entièrement décrite par une théorie plus simple à $(n - 1)$ dimensions. Dans la théorie des cordes – la théorie la plus aboutie pour unifier la relativité générale et la physique quantique –, cette idée a conduit à une approche novatrice pour créer une théorie quantique de la gravitation.

La gravitation en deux dimensions est un scénario simplifié sur lequel on pourrait tester cette approche. Mais Edward Witten et Alexander Maloney, à l'université McGill, ont créé la surprise en suggérant que les prédictions de la théorie holographique pourraient échouer dans le cadre bidimensionnel. Les trous noirs auraient des propriétés thermiques incohérentes.
Si ces théoriciens ont raison, alors la gravitation en deux dimensions est un phénomène encore plus subtil que nous ne l'avons suspecté jusqu'à présent. Peut-être n'a-t-elle pas de sens en elle-même et doit-elle être couplée avec d'autres types d'interactions et de particules. Peut-être le principe holographique n'est-il pas toujours valable. Peut-être l'espace, comme le temps, n'est-il pas un ingrédient fondamental de l'univers.

Une piste pour contourner ces obstacles théoriques a été suivie récemment avec l'élaboration d'un modèle un peu plus complexe que la gravitation quantique en 2D. Il s'agit de la gravité topologiquement massive. Ici, les équations de champ de la relativité générale sont modifiées par l'ajout d'un nouveau paramètre qui ne dépend que de la topologie de l'espace-temps et pas de sa géométrie. La conséquence est l'apparition d'un degré de liberté qui se traduit par la possibilité de la propagation d'une onde gravitationnelle, ou bien, en théorie quantique, un graviton. C'était impossible avec le modèle classique de la gravitation quantique à deux dimensions.

Ce modèle a récemment connu un regain d'intérêt pour ses propriétés intéressantes qui permettent de tester la correspondance anti-de Sitter et théorie conforme des champs (notée AdS/CFT). Cette conjecture relie, d'une part, les théories conformes des champs (des théories quantiques des champs) et, d'autre part, les espaces anti-de Sitter, qui sont des théories de la gravité quantique, formulées en termes de théorie des cordes. L'enjeu est donc de taille.

La gravitation quantique en deux dimensions était au départ un simple cadre destiné à explorer des idées sur la gravitation quantique dans le monde réel. Mais ce modèle nous a surpris par sa richesse : le rôle important de la topologie, ses trous noirs remarquables, ses étranges propriétés holographiques. Abbott n'aurait sans doute pas cru que *Flatland* se révélerait si fécond ! ■

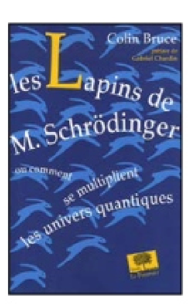
articles

- **E. ALTAS et B. TEKIN, Holographically viable extensions of topologically massive and minimal massive gravity ?, *Phys. Rev. D*, vol. 93, 025033, 2016.**
- **S. SOROUSHFAR *et al.*, Study of geodesic motion in a (2+1)-dimensional charged BTZ black hole, *Phys. Rev. D*, vol. 93, 104037, 2016.**
- **A. BANERJEE *et al.*, Exact solutions in (2+1)-dimensional anti-de Sitter space-time admitting a linear or non-linear equation of state, *Astrophysics and Space Science*, vol. 355, 2015.**
- **C. CALLENDER, Le temps est-il une illusion ?, *Pour la Science*, n° 397, 2010.**

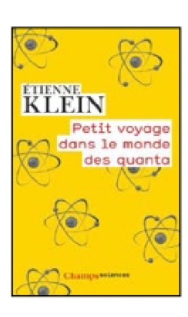
À LIRE EN PLUS

Les Lapins de M. Schrödinger

Physicien à Oxford, en Grande-Bretagne, l'auteur expose ici avec verve les bizarreries du monde quantique et livre une interprétation moderne de la théorie quantique, en expliquant comment la comprendre sans faire appel à des comportements aléatoires, ou à des interactions fantomatiques. Il propose de remplacer l'interprétation de Copenhague par celle d'Oxford, un changement qui aurait des conséquences importantes sur les applications que l'on peut attendre de la physique quantique.



Colin Bruce, (372 pages, 27 euros), Le Pommier, 2011.



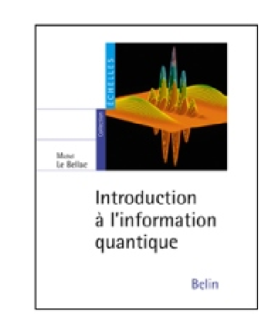
Étienne Klein, (224 pages, 8 euros), Flammarion, Champs sciences, 2016.

Petit voyage dans le monde des quanta

La physique quantique ne laisse pas d'intriguer, de fasciner, d'exaspérer parfois. Elle demeure pourtant méconnue, victime de stéréotypes : on l'invoque pour cautionner tel phénomène étrange, mais on néglige d'en décrire les principes fondamentaux. Quels sont ces principes qui trouvent des applications toujours plus fascinantes, du laser à la cryptographie quantique, en passant par la téléportation ? D'où provient cette incroyable efficacité de la physique quantique ? Un indispensable pour tout non-physicien désireux de compléter sa culture générale.

Introduction à l'information quantique

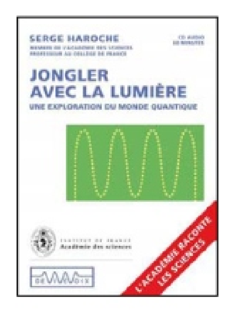
Ce livre est une introduction concise et précise, accessible pour l'essentiel aux non-spécialistes, aux bases de cette nouvelle discipline qu'est l'information quantique. Celle-ci occupera bientôt une place importante en informatique avec notamment les ordinateurs et la cryptographie quantiques, cette dernière étant opérationnelle depuis peu. Cet ouvrage jette un pont entre deux communautés, celle des informaticiens et celle des physiciens. Tout le monde y a aussi sa place.



Michel Le Bellac (372 pages, 27 euros), Belin, 2010.

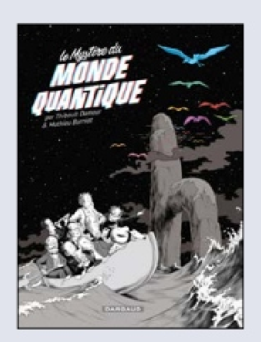
Jongler avec la lumière

Cette « exploration du monde quantique » est un aperçu lumineux et accessible de la recherche en physique quantique aujourd'hui. Serge Haroche, Prix Nobel de physique en 2012, nous entraîne dans ses propres expériences consistant à piéger les particules pour nous faire comprendre comment notre monde classique émerge du monde quantique. On saisit alors mieux pourquoi les notions contre-intuitives de la physique quantique (les particules sont à la fois des ondes et des particules, elles se manifestent simultanément dans des états différents, elles semblent être partout à la fois…) ne se manifestent pas à notre échelle macroscopique, dans les objets faits de ces mêmes particules.



Serge Haroche, (CD audio, 9,90 euros), De Vive Voix, 2010.

LA BANDE DESSINÉE



Le mystère du monde quantique

Thibault Damour et Mathieu Burniat, (180 pages, 19,99 euros), Dargaud, 2016.

Avec Bob et son chien, Rick, embarquez pour une joyeuse épopée dans les mystères du monde quantique ! La physique quantique est partout autour de nous, tant dans l'infiniment grand que dans l'infiniment petit. Mais ce qu'elle dit du monde qui nous entoure diffère de manière vertigineuse de ce qu'on observe et ressent au quotidien. Partez à la rencontre de ceux qui ont théorisé et créé la physique quantique : Planck, Einstein, le prince de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Born, Everett…



Rendez-vous

DOSSIER 91 MATHS

Plus douce sera la chute

Des mathématiciens ont imaginé la corde idéale pour adoucir la chute des grimpeurs. Hélas, cette corde n'est que théorique !

La recherche de formes optimales, décrite dans le *Dossier* n° 91, *Quand les maths prennent formes*, a diverses motivations : économiques, esthétiques, performances... Elle peut aussi permettre de gagner en sécurité. La preuve avec les cordes d'escalade qui sont le seul secours du grimpeur quand il dévisse et tombe. Davit Harutyunyan et ses collègues, mathématiciens à l'université d'Utah, à Salt Lake City, aux États-Unis, ont montré comment fabriquer une corde idéale qui rend moins inconfortable la chute.

Le secret ? Les matériaux à mémoire de forme tels que le nitinol, un alliage de nickel et de titane que l'on trouve dans les stents artériels, les montures de lunettes, les hanches artificielles, les clubs de golf... Ils retrouvent spontanément leur forme d'origine après une transformation mécanique et de plus absorbent beaucoup d'énergie quand ils sont déformés.

Les cordes actuelles, en nylon, sont dynamiques, c'est-à-dire qu'elles sont conçues pour s'étirer de façon à absorber une partie de l'énergie quand elles se tendent en bout de chute. Cependant, la force subie par l'individu sera d'autant plus grande qu'il tombera de haut et il aura tendance à osciller brutalement en fin de course. Qui plus est, ces cordes se fragilisent après chaque incident.

Pour y remédier, les mathématiciens ont élaboré une équation aux nombreuses variables qui prédit les propriétés d'une corde faite avec un matériau à mémoire de forme : la longueur de la chute, la longueur de la corde entre le mousqueton accroché dans la roche et le grimpeur, la hauteur du grimpeur au-dessus du mousqueton... Selon les auteurs, cette équation indique que la force exercée sur le grimpeur sera constante à mesure que la corde s'allongera.

Dans les faits, cela se traduirait ainsi. D'abord, le grimpeur tombe comme avec une corde normale jusqu'à ce qu'elle se tende et... se contracte. De là, la corde exerce une force sur le grimpeur qui ralentit sa chute et, au lieu de le faire rebondir violemment, le fait remonter doucement.

Que les férus d'escalade ne se réjouissent pas trop vite. Ces travaux restent théoriques, car le prix des matériaux à mémoire de forme interdit aujourd'hui leur mise en application.

D. Harutyunyan *et al.*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P : Journal of Sports Engineering and Technology*, 1754337116653539, 2016

» Un grimpeur assuré par une corde en nylon.

©Kenny Warnick, Université d'Utah



» Pour grimper, le nylon tient la corde. Pour combien de temps encore ?

© Krushelss/Shutterstock.com

» *On a retrouvé Philae !*

Le 30 septembre 2016, la mission *Rosetta*, décrite en détail dans le *Dossier* n° 90, *Les débuts du Système solaire*, s'achèvera par le crash de la sonde sur la comète 67P/Tchourioumov-Gerasimenko. Aussi est-ce avec bonheur que les équipes ont repéré l'atterrisseur *Philae* grâce à un cliché de la caméra Osiris pris à 2,7 kilomètres de la comète. L'engin, qui s'était posé le 12 novembre 2014, est coincé dans un repli sombre qui explique la difficulté de communiquer avec lui. Selon Matt Taylor, responsable scientifique de la mission *Rosetta*, les informations transmises pourront désormais être replacées dans leur contexte. C'est donc l'esprit un peu plus tranquille que les chercheurs assisteront aux derniers instants de *Rosetta*.

Le communiqué de l'Esa : http://bit.ly/PLS-Phila

» *La toxoplasmose en avant*

Le *Dossier* n° 89, *Relever le défi du réchauffement*, détaillait les liens entre les modifications du climat et les risques de voir les agents pathogènes changer d'ère. Elizabeth VanWormer, de l'université de Californie, à Davis, aux États-Unis, et son équipe viennent de mettre à jour un nouveau risque. Tout commence par un mystère : à la fin des années 1990, *Toxoplasma gondii*, un parasite des chats responsable de la toxoplasmose, entraîna la mort de nombreuses loutres de mer près des côtes californiennes. L'explication réside dans l'urbanisation effrénée qui diminue la surface occupée par les habitats naturels et dans le changement du régime de précipitations dû au réchauffement climatique. Ces deux facteurs conjugués facilitent le transport de l'agent pathogène par les pluies qui ruissellent au lieu de pénétrer dans le sol. Entre autres recommandations, Elizabeth VanWormer propose donc d'inciter les propriétaires de chats à récupérer leurs déjections.

Elizabeth VanWormer *et al*, *Scientific Reports*, vol. 6, art. 29252, 2016

DOSSIER 92 INTELLIGENCE

Le secret de l'intelligence

Comment définir ce qu'est l'intelligence ? Plusieurs articles du *Dossier* n° 92, *Notre cerveau a-t-il atteint ses limites ?* abordaient cette question et proposaient de nombreuses réponses. Jianfeng Fen des universités de Shanghai, en Chine et de Warwick, en Grande-Bretagne, et ses collègues vient d'en ébaucher une nouvelle, fondée sur l'analyse IRM de un millier de cerveaux. Qu'ont-ils découvert ?

Les connexions des aires du cerveau associées à l'intelligence, notamment à l'apprentissage, alternent très rapidement leurs connexions avec d'autres parties du cerveau. Les échelles de temps sont de l'ordre de la minute voire de la seconde. Le rôle de cette variabilité est confirmé par des analyses de cerveaux déficients, par exemple ceux de schizophrènes.

Selon les auteurs, ces résultats aideront à mieux comprendre les déficiences mentales. En outre, l'intelligence artificielle gagnerait en efficacité en intégrant cette idée de variabilité. Introduisons de l'inconstance dans les machines !

J. Zhang *et al*, *Brain*, vol. 139, pp. 2307-2321, 2016



© Hubis/Shutterstock.com

L'intelligence dépendrait de la versatilité des connexions dans le cerveau.

DOSSIER 90 SYSTÈME SOLAIRE

Un volcan de glace sur Cérès

Cérès est l'une des planètes naines évoquées dans le *Dossier* n° 90, *Les débuts du Système solaire*. Ce corps, situé dans la ceinture principale d'astéroïdes, entre les orbites de Mars et Jupiter, est scruté en détail par la sonde *Dawn*, de la NASA, depuis mars 2015.

La dernière trouvaille est de taille : Ahuna mons, un volcan gelé, culmine à plus de 4 000 mètres de hauteur, soit presque l'altitude du mont Blanc (le rayon de Cérès est de seulement 950 kilomètres contre 6 400 pour la Terre). Cependant, ce volcan n'éjecte pas de lave, mais plutôt une eau boueuse qui gèle à mesure qu'elle est éjectée : c'est un cryovolcan, comme on en a déjà repéré sur Pluton.

Sa présence trahit une activité passée en dessous de la surface à – 40 °C de Cérès, notamment la circulation de fluide qui a ensuite suinté en surface.

Plusieurs articles de *Science*, vol. 353, 2016



© Dawn Science Team & NASA_JPL-Caltech_GSFC

Ahuna Mons, un volcan de glace, trône sur Cérès.

DOSSIER 89 CLIMAT

Un chaud-froid de feuilles

Le *Dossier* n° 89, *Relever le défi du réchauffement*, montrait comment les modèles d'évolution du climat gagnent en précision à mesure qu'ils prennent en compte de nouvelles contributions. L'une d'elles vient d'être mise au jour par Sean Michaletz, de l'université d'Arizona, à Tucson, aux États-Unis. Lui et ses collègues ont révélé que les plantes régulent la température des feuilles pour améliorer la capture du carbone atmosphérique, et ce indépendamment de la température extérieure. Quand il fait froid la feuille est plus chaude, et vice versa.

Pour arriver à ce résultat, les chercheurs ont élaboré une nouvelle théorie qui tient compte des deux éléments centraux : d'abord, les flux entrants et sortants d'énergie thermique ; ensuite, une modèle selon lequel la forme et la fonction d'une feuille sont contraintes par l'efficacité de l'absorption du carbone. En combinant ces éléments avec des données recueillies sur des feuilles de très nombreuses espèces, qui montrent la réalité de la thermorégulation, ils prouvent que la thermorégulation aide à maximiser la photosynthèse et donc l'apport en carbone.

Selon Sean Michaletz, les modèles climatiques devront intégrer ces résultats pour améliorer leur pertinence.

S. Michaletz *et al.*
Nature Plants, vol. 2, art. 16129, 2016



©Benjamin Blonder

Une image thermique montre le détail des variations de températures (du clair au sombre, les températures diminuent) dans des feuilles.

DOSSIER 91 MATHS

Recette pour un quasi-cristal

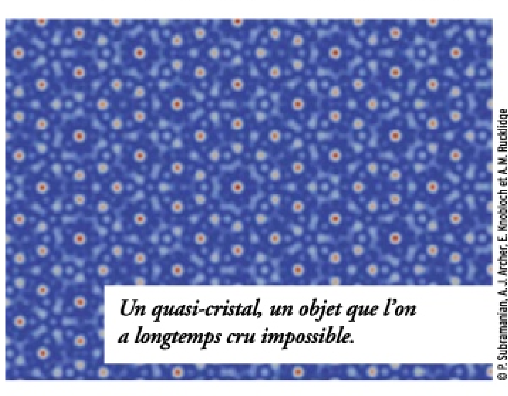
Les pavages sont un jeu sur les formes à l'honneur dans le *Dossier* n° 91, *Quand les maths prennent formes*. Les plus célèbres sont les pavages de Penrose, découverts dans les années 1970, qui ont la particularité d'être non périodiques, car fondés sur un pentagone. Dans les années 1980, Dan Schechtman a identifié les équivalents de ces pavages (au départ seulement théoriques) dans des solides : ce sont les quasi-cristaux. Et maintenant, Priya Subramanian, mathématicienne à l'université de Leeds, en Grande-Bretagne, et ses collègues ont identifié les caractéristiques indispensables à un tel quasi-cristal.

L'une d'elles est qu'un motif doit se répéter à deux échelles différentes dans des proportions appropriées, en l'occurrence, irrationnelles. Ces proportions peuvent par exemple relever du nombre d'or, un rapport que l'on retrouve justement dans les pentagones.

Un tel modèle permet d'explorer la compétition entre les différents types de cristaux quand ils se forment, et donc de repérer quelles conditions privilégient l'apparition de quasi-cristaux dans la nature.

On peut également imaginer en fabriquer pour mettre au point des lasers très performants, voire des peintures aux propriétés remarquables !

P. Subramanian *et al.*,
Phys. Rev. Lett., *vol.* 117, 075501, 2016



© P. Subramanian, A. J. Archer, E. Knobloch et A. M. Rucklidge

Un quasi-cristal, un objet que l'on a longtemps cru impossible.

» La chasse à la planète X

Le *Dossier* n° 90, *Les débuts du Système solaire*, s'intéressait à une mystérieuse neuvième planète, la planète X qui habiterait une orbite très éloignée de celles des autres planètes du Système solaire. La traque bat son plein et Scott Sheppard, de l'institut Carnegie, à Washington, avec Chadwick Trujillo, de l'université d'Arizona du Nord, ont récemment joué le rôle de rabatteurs ! Comment ? Ils ont annoncé avoir localisé plusieurs objets dits transneptuniens orbitant au-delà même de la ceinture de Kuiper. Ce n'est pas à proprement parler des traces de la planète X, mais les caractéristiques de ces objets imposent de nouvelles contraintes sur cette mystérieuse planète. On l'imagine être jusqu'à 15 fois plus massive que la Terre et passant sur son orbite très allongée au plus près du Soleil à plus de 5 fois la distance entre notre étoile et Pluton (soit 200 fois la distance Terre-Soleil) ! Les deux astronomes ont couvert avec leurs instruments environ 10 % du ciel. La planète X peut encore rester cachée.

Le communiqué du CERN.
http://bit.ly/Secteur

» Malin comme un corbeau

Le *Dossier* n° 92, *Notre cerveau a-t-il atteint ses limites ?* vantait l'intelligence de plusieurs espèces animales, dont les corbeaux. Elle vient d'être confirmée par les travaux de Can Kabadayi, de l'université de Lund, en Suède, et de ses collègues. Réagissant à un palmarès publié en 2014 où ne figuraient pas ces oiseaux, ils ont appliqué les tests employés à l'époque et montré que trois espèces de corvidés obtenaient les mêmes résultats que les primates. Ces tests mettent en évidence une sorte de *self-control* pour obtenir de la nourriture. Cela confirme que la taille du cerveau n'est pas un critère pour évaluer l'intelligence.

C. Kabadayi *et al.*, *Royal Society Open Science*, 160104, 2016

Plein d'amis Yoda a

« Rogue One », le prochain opus de Star Wars, *débarque sur les écrans le 14 décembre 2016. C'est l'occasion de réviser les liens qui unissent tous les personnages des sept épisodes déjà sortis.*

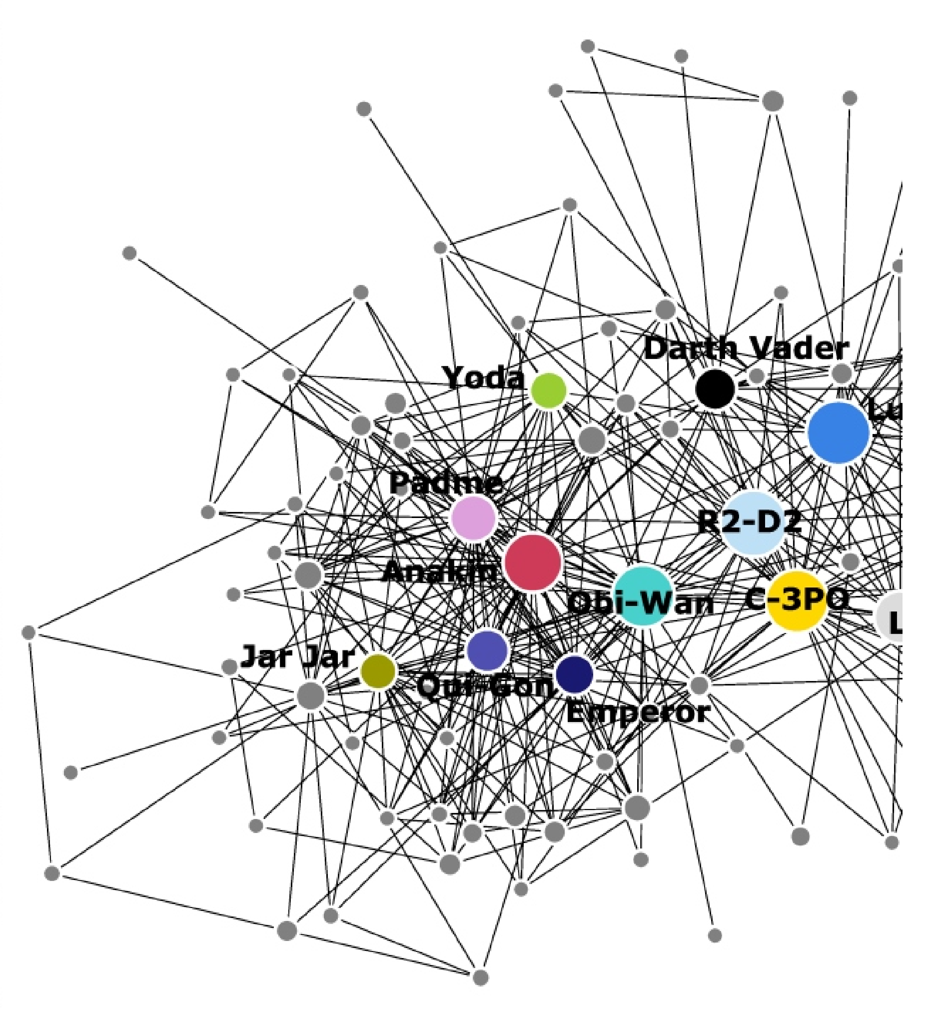
La saga *Star Wars* a débuté il y a presque… quarante ans. Riche de sept épisodes et de prochains à venir, elle dessine un univers tout entier peuplé de très nombreux personnages. À moins d'être un fan inconditionnel et d'avoir vu de nombreuses fois chaque film, il est difficile d'avoir une vue d'ensemble. Les travaux d'Evelina Gabasova, de l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, peuvent nous aider.

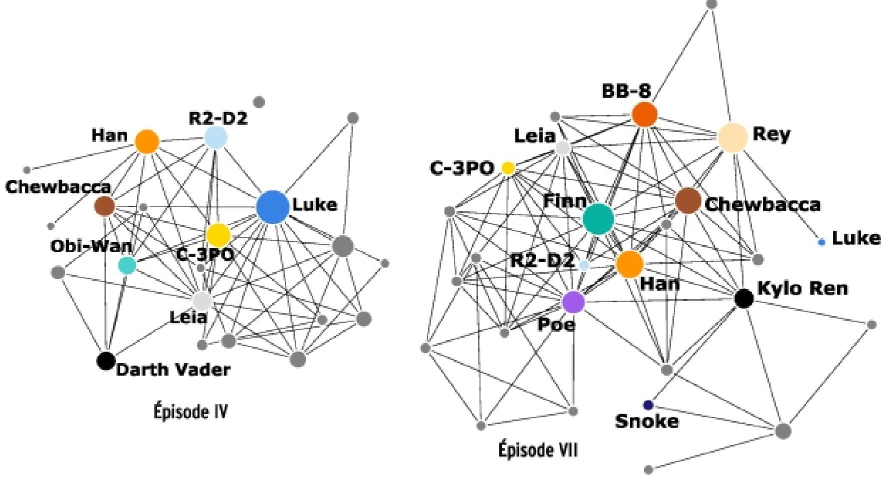
À partir de tous les scripts, elle a reconstitué sous forme de graphes le réseau de l'ensemble des personnages *(ci-contre)* : ceux qui se parlent dans une scène sont reliés. Plus un personnage apparaît souvent, plus le point qui lui correspond est grand.

On distingue la première trilogie (de 1977 à 1983) dans la partie droite du réseau, et la deuxième (de 1999 à 2005) à gauche. Cela s'explique par le fait que beaucoup de personnages n'apparaissent que dans l'une ou l'autre des séries. L'épisode VII qui met en scène des personnages de la première trilogie est en bas à droite. Autre observation, les robots (R2-D2 et C-3PO) ont un rôle social important, car ils sont très présents dans tous les films.

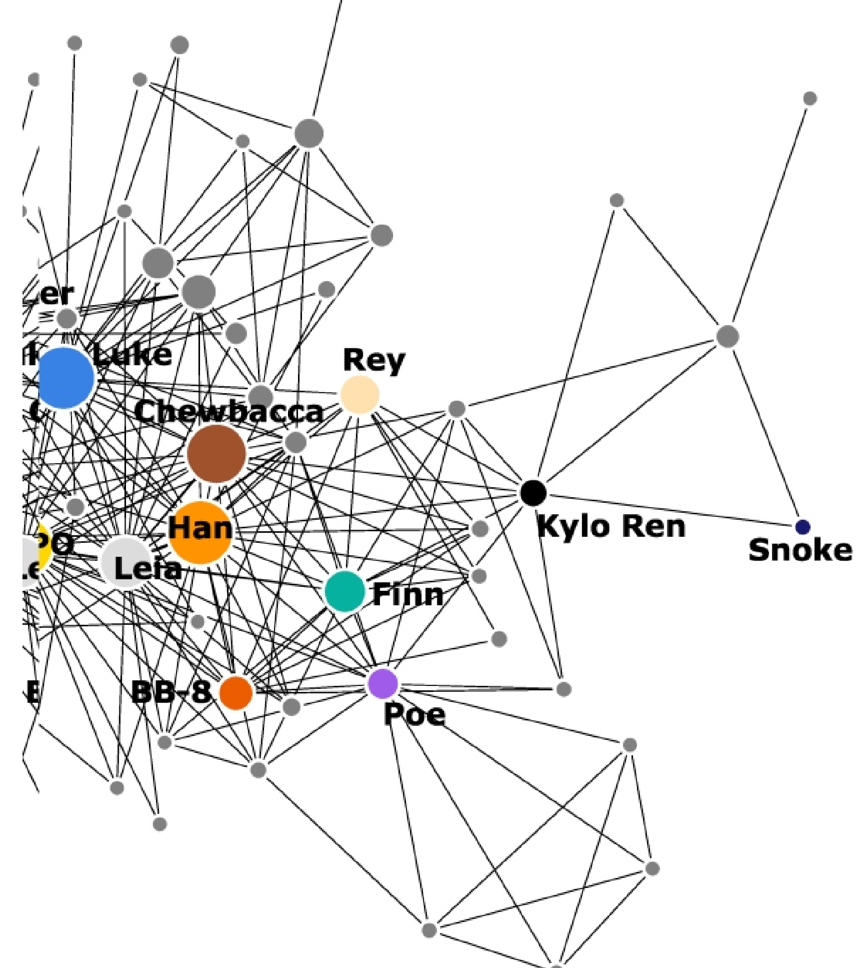
On remarque aussi que les deux sous-graphes sont plutôt semblables, avec peu de nœuds et une densité élevée. Toutefois, une analyse plus fine révèle que la première trilogie a une structure plus compacte, avec moins de personnages centraux. Peut-être est-ce pour cette raison, du moins en partie, qu'elle est plus populaire ?

Pour en savoir plus, le site d'Evelina Gabasova: http://evelinag.com/

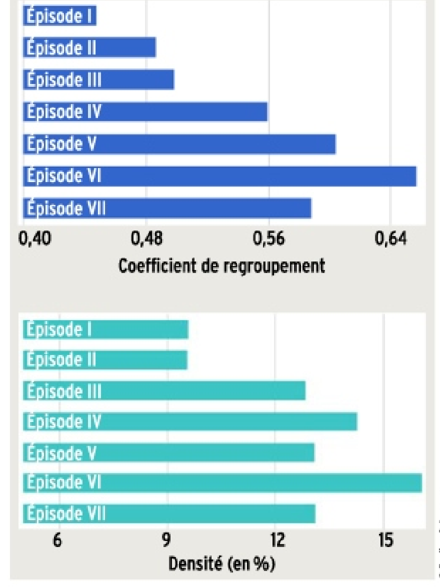




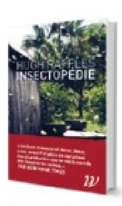
LES ÉPISODES IV *UN NOUVEL ESPOIR* ET VII *LE RÉVEIL DE LA FORCE* ont à première vue beaucoup de points communs scénaristiques. Est-ce que cette similarité se retrouve dans les réseaux correspondants ? Dans le dernier film *(à droite)*, on distingue un dense sous-réseau des personnages principaux (essentiellement les membres de la Résistance) reliés à une constellation de seconds rôles. On remarque aussi, en bas du réseau principal, le sous-réseau des personnages du Premier Ordre (Kylo Ren, Snoke...). Les réseaux sont certes similaires, mais celui de l'épisode VII est plus riche que celui de l'épisode IV. Il réunit plus de personnages et a plus de liens faibles entre certains des héros. C'est sans doute parce que le film le plus récent met en scène plusieurs des personnages anciens et déjà connus ainsi que de nouveaux.



On peut comparer les différents épisodes avec deux types de critères. Le coefficient de regroupement *(en bleu)* traduit la question : « Combien de vos amis sont-ils amis entre eux ? » On constate que les épisodes de IV à VII suivent plusieurs personnages qui interagissent de cette façon.
La densité du réseau *(en vert)* mesure le nombre de liens réels par rapport à tous ceux possibles. À cet aune, l'épisode VI *Le Retour du Jedi* est le plus dense, car il comporte très peu de personnages secondaires. C'est aussi parce que les Ewoks n'ont pas été pris en compte !



À LIRE

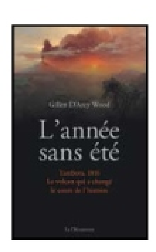


Insectopédie

Hugh Raffles, (440 pages, 24 euros), Wildproject, 2016.

Connaissez-vous les *konchû-shônen* ? Au Japon, ces individus sont des passionnés d'insectes qui passent beaucoup de temps à les collectionner ou, au moins, l'ont fait étant enfants. Ce fut notamment le cas de Hayao Miyazaki, le père de *Mon voisin Totoro*, *Princesse Mononoké* et du *Voyage de Chihiro*. Selon l'auteur, professeur d'anthropologie à New York, ce comportement favorise une sensibilité particulière au le monde qui vous entoure.

Cet exemple est l'une des nombreuses relations hommes-insectes détaillées dans l'ouvrage. C'est que les insectes sont partout ! Alors autant s'en accommoder et même apprendre à cohabiter. À travers vingt-six récits ordonnés en un abécédaire et relevant autant de la biologie que de l'histoire, la littérature, la politique, l'art... on découvre que d'autres liens sont possibles avec ces petites bêtes à six pattes que le simple dégoût (le plus souvent). Ainsi en va-t-il de cette histoire : après le bombardement de Tokyo, en 1945, un certain Yajima Minoru errait dans les ruines quand il aperçut une libellule pondant. Ce fut pour lui le signe qu'une renaissance est possible après un cauchemar.



L'Année sans été

Gillen D'Arcy Wood, (304 pages, 22 euros), La Découverte, 2016.

En 2016, l'été a plutôt été clément et généreux en soleil. Il y a 200 ans, il en fut tout autrement, car 1816 fut une année sans été. En France, dans un pays à peine remis des guerres napoléoniennes (nous sommes un an après Waterloo) les rendements agricoles chutent, les vendanges ont lieu fin octobre. De début juin à fin août, on n'a recensé que treize jours de ciel dégagé. Ailleurs, la situation est tout autant catastrophique. En Asie, des milliers de personnes meurent de la famine. En Amérique du Nord, les prix du blé et du maïs ont presque doublé et conduisent à la première grande crise économique. Dans le golfe du Bengale, l'absence de mousson provoque une mutation du germe du choléra, dont l'épidémie s'étend à Moscou, Paris et la Nouvelle-Angleterre. En Suisse, où l'état d'urgence a été décrété, Lord Byron, reclus dans sa villa écrira... *Les Ténèbres*.

Ces phénomènes s'expliquent par l'éruption du Tambora, un volcan indonésien qui, un an plus tôt avait projeté dans l'atmosphère suffisamment de poussières pour filtrer le rayonnement solaire pendant plusieurs années.

Gillen D'Arcy Wood, professeur à l'université de l'Illinois, aux États-Unis, retrace toutes les retombées effroyables de ce qui fut une grande crise climatique. Une leçon à méditer à l'heure où l'on peine à croire que l'on maintiendra le réchauffement en cours en deçà de 2 °C.

À ÉCOUTER

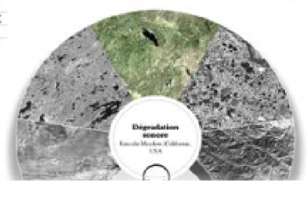


Climat : la théorie du chaos ?

Le climat est-il gouvernable ? Et, d'abord, qu'est-ce que gouverner le climat ? Qu'est-ce que le chaos en science ? Dans l'émission *La Méthode scientifique*, Nicolas Martin tente de répondre à ces questions avec son invitée Amy Dahan, mathématicienne et historienne des sciences, directrice de recherche émérite au CNRS. Ses travaux portent principalement sur l'histoire des systèmes dynamiques et la science du chaos et notamment sur les modélisations de systèmes complexes appliquées au climat. Dans son dernier ouvrage, elle revient sur les vingt dernières années de négociations internationales pour contenir le réchauffement climatique. Un deuxième chaos est donc abordé, celui dans lequel sombre, sur le plan politique, la lutte contre le réchauffement.

http://bit.ly/PLS-LaMetSci

À CLIQUER



Le Grand orchestre des animaux

Dans le prolongement de l'exposition présentée à la Fondation Cartier pour l'art contemporain, ce site (fondé sur des technologies web inédites développées par la société Upian) fait de vous le chef d'orchestre de la nature. Guidé par les voix de Bernie Krause en anglais et de l'artiste Camille en français, vous découvrez dans une expérience interactive sans précédent les mystères de l'harmonie acoustique du règne animal.

À travers cinq scénarios interactifs, les internautes de tous âges s'approprient les grands concepts associés au travail de Bernie Krause (les niches sonores, la dégradation sonore...). La liberté est totale, on y passe cinq minutes... ou toute la journée.

www.legrandorchestredesanimaux.com

PÊLE-MÊLE

Le Mooc *Science Tag* sur les médiations culturelles et scientifiques à l'ère des réseaux sociaux s'adresse aux médiateurs, aux étudiants et doctorants, au personnel d'un musée, d'une université, d'un centre de recherche... et à tous ceux qui veulent découvrir de nouvelles façons de faire de la médiation culturelle et scientifique sur le numérique. Rappelons qu'un Mooc est un *Massive Open Online Course*, c'est-à-dire un « cours en ligne ouvert et massif ». Conçus par le consortium *Inmédiats*, les cours qui le constituent s'échelonnent sur quatre semaines (du 21 septembre au 18 octobre 2016) et feront de vous un animateur de communauté culturelle scientifique.
http://www.sciences-tag.fr/

La vidéo *The Lifecycle of a Mushroom*, de Thomas Beg (avec une musique de Harry Raderman) présente le cycle de vie d'un champignon, en l'occurrence une amanite tue-mouches *(Amanita muscaria)*. Le film d'animation a été fait dans l'esprit des premiers dessins animés de Walt Disney, dans les années 1920, les *Silly Symphonies*. Cette vidéo enjouée a été réalisée dans le cadre de *Spectacular Science*, un projet collaboratif associant l'université des arts créatifs et celle du Kent, en Grande-Bretagne, et dont l'objet est de diffuser au grand public le savoir scientifique. C'est sûr que de cette façon, les termes techniques de caryogamie, noyau diploïde ou haploïde, basidiospore... passent beaucoup mieux !
http://vimeo.com/31324153

À VOIR



Mutations urbaines

En 2008, le nombre d'individus vivant en zone urbaine a dépassé celui des personnes en milieu rural. Le phénomène se poursuit.... Ce phénomène planétaire est lourd de conséquences pour nos villes et donc pour nos vies. Pour relever ces défis, les initiatives et les innovations, qu'elles soient industrielles, municipales ou citoyennes, sont nombreuses. L'exposition *Mutations urbaines* en présente une sélection.

Elle aborde à la fois les aspects technologiques, humains et symboliques des évolutions urbaines. Dans un espace de 1000 mètres carrés, la scénographie est construite à la façon d'une ville ouverte, sans cloison ni frontière. On y distingue néanmoins trois univers qui reflètent les réflexions actuelles sur le milieu urbain : *Villes sous tensions*, *Terre urbaine* et *Devenirs urbains*.

Dans le premier, on découvre comment la ville résulte de multiples interactions qui tissent un réseau où s'affrontent de nombreuses considérations environnementales, immobilières, communicationnelles... Cette première section s'arrête sur des problématiques fortes des villes aujourd'hui, et en premier lieu, celle du numérique : comment l'usage des réseaux sociaux influe-t-il sur la façon de vivre et d'occuper les espaces urbains ? Comment les centres de données, qui gardent traces de toutes nos activités numériques, s'insèrent-ils dans le paysage urbain ? Sont aussi abordés la croissance urbaine, les déplacements des enfants, la place et l'influence des tours, les bidonvilles...

L'espace *Terre Urbaine* consiste en un spectacle collectif et immersif qui donne à voir les enjeux globaux de l'urbanisation à travers un dispositif de datavisualisation. Les données sont projetées sur un écran hémisphérique de 8 mètres de longueur et 3,50 mètres de hauteur sous la forme de quatre séquences : l'urbanisation de la planète ; la diversité de territoires urbanisés ; villes, pollution et environnement ; villes, richesses et société. De quoi offrir aux spectateurs un panorama le plus juste possible des transformations que nous vivons aujourd'hui.

Devenirs urbains, la troisième section, fait la part belle aux initiatives pour répondre aux nombreux défis que posent les villes. En influant sur les politiques environnementales ou industrielles, les citoyens ont la possibilité de se réapproprier leur territoire. C'est l'occasion de faire un tour du monde des expérimentations pour sécuriser, faciliter, partager la ville tous ensemble. En fin de compte, on sort de l'exposition armé pour devenir bien urbain !

Mutations urbaines. La ville est à nous ! *à la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, du 14 juin 2016 au 5 mars 2017.*
http://bit.ly/PLS-MutUrb

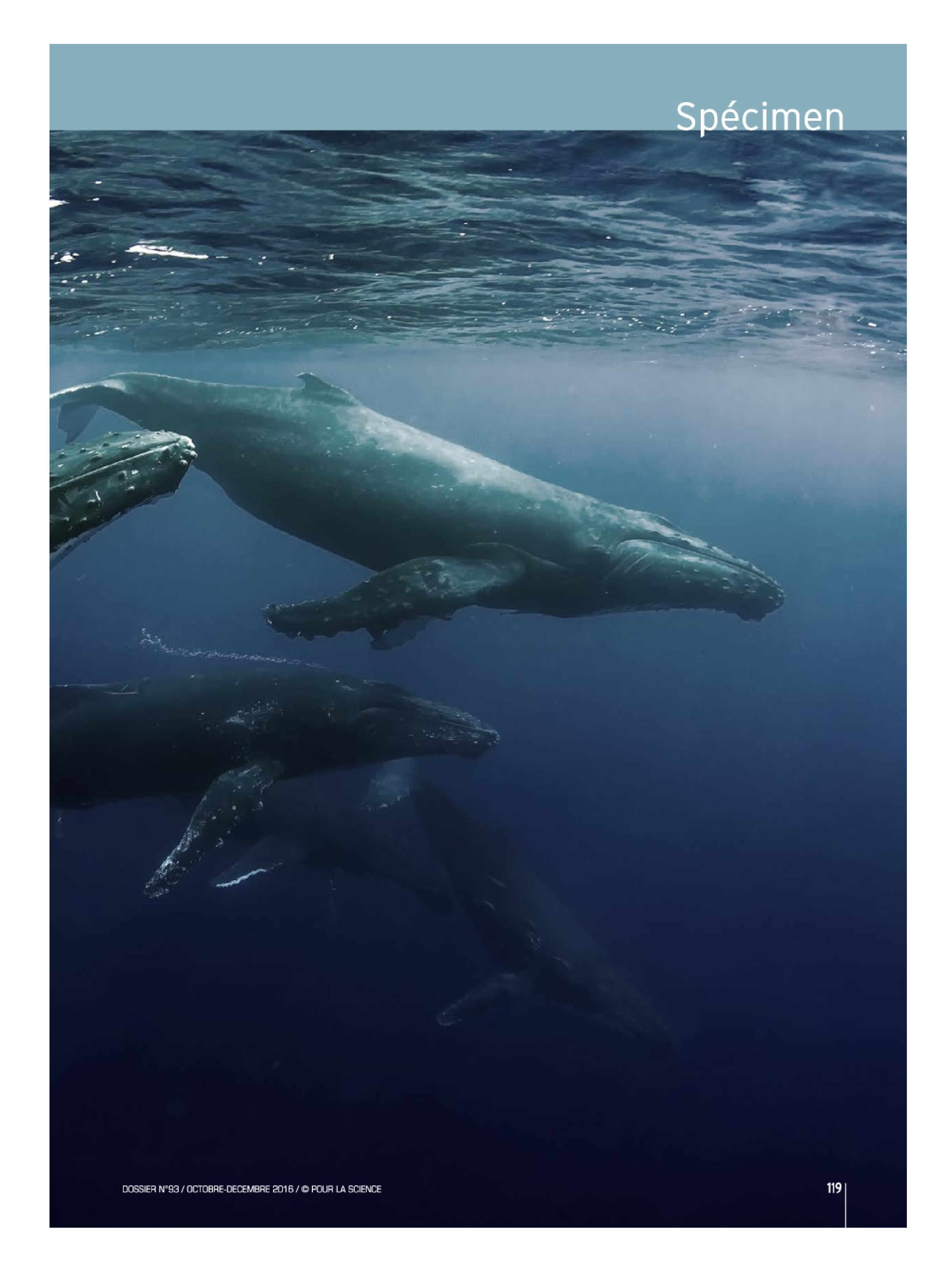
Les baleines mangent en silence

Les baleines à bosse* (Megaptera novaeangliae) *sont des chasseurs efficaces qui usent de plusieurs techniques, tels l'étourdissement des proies (krill et petits poissons) avec leurs nageoires, le filet à bulles pour contenir les proies ou bien la nage sur le côté au ras du fond de l'océan. Hannah Blair, de l'université de Syracuse, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que ces comportements sont perturbés par la pollution sonore, toujours en augmentation, due aux navires croisant dans les parages. En particulier, les descentes sont plus lentes et le basculement sur le côté au fond est plus rare.



H. Blair et al., Evidence for ship noise impacts on humpback whale foraging behaviour, Biology Letters, vol. 12(8), 20160005, 2016.

Cette photographie est extraite du blog Best of Bestioles *: http://bit.ly/PLS-BOB. Retrouvez tous les billets de ce blog en flashant le code ci-contre.*



La grande symfaunie

Une exposition propose un échantillon des paysages sonores qui rendent compte de la diversité du monde, et des menaces qui pèsent sur elle. D'autres œuvres complètent cette installation pour orchestrer une symphonie animale en sons et lumières.

Loïc Mangin

Envie d'évasion ? Partez avec vos oreilles ! Plus précisément, installez-vous dans la grande salle de la Fondation Cartier pour l'art contemporain, à Paris, et là, plongé dans l'obscurité, écoutez. En quelques instants, vous êtes transporté dans l'un des sept territoires dont le musicien et bioacousticien américain Bernie Krause a dressé le paysage sonore. C'est un tour du monde en sons : l'Amazonie brésilienne, une forêt de l'Ontario, au Canada, une clairière marécageuse en République Centrafricaine, la toundra en Alaska, la savane au Zimbabwe, les montagnes de la Sierra Nevada, aux États-Unis, et enfin, l'océan (de la Nouvelle-Zélande aux Caraïbes, en passant par Hawaï).

Dans les années 1960 et 1970, Bernie Krause collabora avec les Doors, Stevie Wonder, George Harrison... et contribua à quelques musiques de films (*Rosemary's Baby, Love Story, Apocalypse Now*...)

Dans l'un des albums du groupe qu'il formait avec Paul Beaver, il intégra pour la première fois des enregistrements de la nature qui avaient une place importante dans l'orchestration. Ce fut le début d'une longue histoire : depuis plus de quarante ans, Bernie Krause a collecté près de cinq mille heures d'enregistrements sonores dans des habitats sauvages. Un aperçu représentatif de cette « biophonie » est donné à entendre dans l'exposition à travers un dispositif visuel élaboré par le collectif anglais United Visual Artists (UVA). Aux sons se superposent les sonogrammes dans une installation audiovisuelle tridimensionnelle *(voir page ci-contre, en haut)*.

L'une des séquences les plus troublantes est intitulée *Avant et après*. Elle révèle comment la dégradation de l'environnement se traduit par un effondrement de la diversité sonore dans les enregistrements. Les dommages sont souvent visibles, notamment quand un récif de corail des Fidji blanchit à cause de l'acidification ou lorsqu'une forêt du Costa Rica est surexploitée, mais ce n'est pas toujours le cas. Ainsi, dans un massif de la Sierra Nevada, les effets d'une « coupe sélective » vantée par l'entreprise auprès de la population restent invisibles à l'œil nu. À l'oreille, il en va autrement : la diversité et la densité des oiseaux se sont effondrées.

On peut même détecter les effets du réchauffement climatique, par exemple près d'un étang du Wyoming, aux États-Unis, où



© Cai Guo-Qiang/Fondation Cartier



© Luc Boegly/Fondation Cartier

en trente ans la densité des oiseaux et la diversité des espèces ont là aussi chuté.

Cette prise de conscience n'empêche pas le ravissement de l'ouïe, ainsi que de la vue, avec la deuxième partie de l'exposition mise en scène par les architectes mexicains Gabriela Carrillo et Mauricio Rocha. Dans un écrin de briques rouges évoquant un orchestre, plusieurs œuvres sont présentées.

La plus spectaculaire est un dessin long de 18 mètres du Chinois Cai Guo-Qiang. On y voit diverses espèces d'animaux sauvages réunis autour d'un point d'eau. Cette œuvre *(voir ci-dessous)* a été confectionnée avec de la poudre utilisée d'ordinaire pour les feux d'artifices. Une fois répartie sur le papier, elle a été mise à feu.

On peut aussi sourire à la vue des oiseaux de paradis de Nouvelle-Guinée, filmés par les ornithologues de l'université Cornell, aux États-Unis, ou bien s'enthousiasmer devant les animaux, humains compris, capturés par les pièges photographiques du Japonais Manabu Miyazaki.

Bien d'autres œuvres s'offrent aux visiteurs pour faire de ce « Grand orchestre des animaux » un moment de communion avec le monde et particulièrement les autres êtres vivants qui l'habitent. Science et poésie acoustique s'allient pour nous ravir et nous alerter sur le silence qui menace notre monde. À bon entendeur...

LES PAYSAGES SONORES DE BERNIE KRAUSE s'offrent aux oreilles, mais aussi aux yeux *(ci-dessus)* pour un tour du monde acoustique. Les yeux sont aussi sollicités par un dessin gigantesque *(ci-dessous)* réalisé à la poudre pyrotechnique. Toute l'exposition est un feu d'artifice, sonore et éclatant.

« Le Grand orchestre des animaux », Fondation Cartier pour l'art contemporain, à Paris, jusqu'au 8 janvier 2017

Prolongez l'expérience de façon inédite sur le site : legrandorchestredesanimaux.com



Prochain numéro en kiosque le 6 janvier 2017

Il était une fois l'humanité

L'histoire de l'être humain, depuis son dernier ancêtre commun avec les autres primates, ne cesse de se réécrire à mesure que les découvertes en paléontologie, génétique, biologie... s'accumulent. À chaque fois, elle s'étoffe d'épisodes insoupçonnés, et s'enrichit. Notre histoire est plus étonnante encore que ce que vous pouvez l'imaginer !

© Jannarong/Shutterstock.com

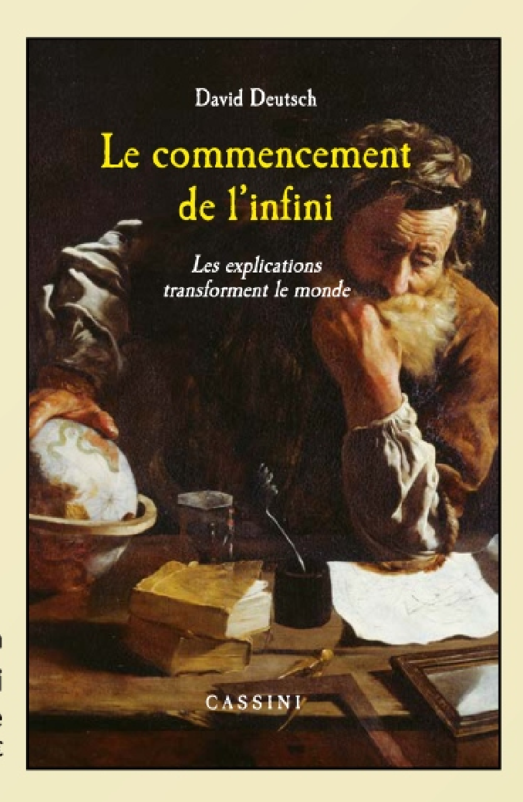
Achevé d'imprimer chez Roto Aisne (02) - N° d'imprimeur N° 16/09/0020 - N° d'édition : M0770693-01 - Dépôt légal : octobre 2016. Commission paritaire n° 0917K82079 du 19-09-02-Distribution : Presstalis- ISSN 1 246-7685- Directrice de la publication et gérante : Sylvie Marcé.

« L'un des esprits les plus brillants
et féconds de notre époque. »
Les Echos

« Un cerveau de la taille de Birmingham.
Un ego plus grand encore. »
The Independent

« Un livre brillant, exaltant et
singulièrement hors du commun. »
The New York Times

« Ce livre vous ouvre l'esprit comme peu
d'ouvrages sont capables de le faire. »
The Guardian



David Deutsch
Le commencement de l'infini
Les explications transforment le monde
518 p., 24 €



« Avec une grande clarté, pas à pas, l'auteur
détaille les mille et une avancées qui ont
métamorphosé notre rapport au monde. »
L'Obs

« Des talents de vulgarisateur qui lui ont
valu le titre de "pape" de la *popular science*. »
Libération

« Un livre vertigineux par son audace,
incontournable de par son érudition et
savoureux grâce aux petites anecdotes
qui le parsèment. »
La Recherche

« Ambitieux et éclairant, théorique mais sexy. »
The New York Times

James Gleick
L'information
L'histoire - La théorie - Le déluge
416 p., 24 €

